

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
Факультет електроніки  
кафедра електронних приладів та пристроїв

«На правах рукопису»  
УДК 621.372.82

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис) Л.Д. Писаренко  
(ініціали, прізвище)

“    ”    \_\_\_\_\_ 2019 р.

## **Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 171 Електроніка**

**на тему:**

**«Датчики зображення на КМОН-ФД кристалах»**

**Виконав:**

студент II курсу, групи ДЕ-81мп

Чирук Василь Миколайович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

**Науковий керівник:** доцент, к.т.н., Шмирьова Л.М.

\_\_\_\_\_  
(підпис)

**Консультант:**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

**Нормоконтроль:** доцент, к.т.н., Чадюк В.О.

\_\_\_\_\_  
(підпис)

**Рецензент:** доцент, к.т.н., Волхова Т.Л.

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроніки  
Кафедра електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною  
програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 171

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Л.Д. Писаренко  
(підпис) (ініціали, прізвище)  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ  
на магістерську дисертацію студенту**

Чирук Василю Миколайовичу

1. Тема дисертації «Датчики зображення на КМОН-ФД кристалах»  
науковий керівник дисертації доцент, к.т.н., Шмирьова Людмила  
Миколаївна затверджені наказом по університету від «07» листопада 2019 р.  
№ 3859-с
2. Термін подання студентом дисертації 03.12.2019
3. Об'єкт дослідження: фотодіодні комплементарні метал-оксид-  
напівпровідник фотоприймальні матриці.
4. Вихідні дані: огляд різновидів конструкцій та принципів роботи  
функціональних пристроїв на приладах із зарядовим зв'язком та КМОН-ФД,  
дослідження параметрів та утворення кольорового зображення КМОН-ФД,  
моделювання та розрахунок двомірної моделі фотоприймальної комірки  
КМОН-ФД, технологія виготовлення змодельованої двомірної комірки.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: змодельовати двомірну модель  
фотоприймальної комірки КМОН-ФД в середовищі приладово-  
технологічного моделювання Sientaurus TCad для промислового  
моделювання, отримати числові значення залежності напруги насичення  
фотодіода від освітленості, описати технологічний процес виготовлення  
комірки КМОН-ФД.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: схематичні зображення, таблиці, структурні схеми; плакати з формулами, графіками.

7. Перелік публікацій: «Еволюція датчиків зображення: КМОН-ФД і ПЗЗ-матриці» Матеріали XIII-ї науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки», КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, 4 квітня 2019 р.; «Приладово-технологічне моделювання активного пікселя КМОН-ФД»

8. Консультанти розділів дисертації

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------|---|----------------|------------------|
|        |   | завдання видав | завдання прийняв |
|        |   |                |                  |

9. Дата видачі завдання: 01.09.2019

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № | Назва етапів магістерської дисертації  | Строк виконання етапів  | Примітка |
|---|--|-------------------------|----------|
| 1 | Огляд науково-технічної літератури по приладах із зарядовим зв'язком                     | 25.04.2019 - 10.06.2019 |          |
| 2 | Дослідження принципу дії та динаміки перенесення зарядів в датчиках зображення           | 25.09.2019 -14.10.2019  |          |
| 3 | Дослідження параметрів та характеристик, методів утворення кольорового зображення        | 15.10.2019 -31.10.2019  |          |
| 4 | Моделювання та розрахунок двовірної моделі фотоприймальної комірки КМОН-ФД.              | 01.11.2019 -10.11.2019  |          |
| 5 | Технологічна частина (написання технології виробництва КМОН-ФД комірки). Стартап-проект. | 11.11.2019 -15.11.2019  |          |
| 5 | Оформлення графічної частини, пояснювальної записки, плакатів, підготовка доповіді       | 16.11.2019 -03.12.2019  |          |

Студент гр. ДЕ-81мп \_\_\_\_\_

**Чирук В.М.**

Керівник проекту \_\_\_\_\_

**Шмирьова Л.М.**

# **Пояснювальна записка до магістерської дисертації**

на тему: «Датчики зображення на КМОН-ФД кристалах»

Київ – 2019 року

## РЕФЕРАТ

**«Датчики зображення на КМОН-ФД кристалах /** Магістерська дисертація освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» спеціальності 171- Електроніка, спеціалізації – Електронні прилади та пристрої. **Чирук Василь Миколайович.** Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» . Факультет електроніки, кафедра електронних приладів та пристроїв. Група ДЕ-81мп. – К.: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2019. – 110 с., іл. 57., 7 табл.

**Ключові слова:** КМОН – комплементарні структури метал-оксид-напівпровідник, ФПЗЗ – фоточутливі пристрої з зарядовим зв'язком, МДН – метал-діелектрик-напівпровідник.

**Короткий зміст роботи:** Дана дипломна робота присвячена детальному вивченню датчиків зображення на КМОН-ФД структурах.

У вступі сформульована головна задача роботи і показана її актуальність. В аналізі літератури представлений огляд науково-технічної літератури по КМОН-ФД та підтверджена перспективність їх розробки. В теоретичній частині приведені основні параметри та характеристики КМОН-матриць, та утворення кольорового зображення. В розділі інженерних розрахунків представлена двомірна модель фотоприймальної комірки КМОН-ФД, отримані числові значення залежності напруги насичення фотодіода від освітленості, описаний технологічний процес виготовлення комірки КМОН-ФД.

## **А Н О Т А Ц І Я**

Дана дипломна робота присвячена вивченню параметрів та характеристик датчиків зображення на КМОН-ФД структурах.

У вступі сформульована головна задача роботи і показана її актуальність. В аналізі літератури представлений огляд науково-технічної літератури по КМОН-ФД та підтверджена перспективність їх розробки. В теоретичній частині приведені основні параметри та характеристики КМОН-матриць, та утворення кольорового зображення. В розділі інженерних розрахунків представлена двомірна модель фотоприймальної комірки КМОН-ФД, отримані числові значення залежності напруги насичення фотодіода від освітленості, описаний технологічний процес виготовлення комірки КМОН-ФД.

## **A N M E R K U N G**

Diese Diplomarbeit widmet sich der Untersuchung von Parametern und Eigenschaften von Bildsensoren auf CMON-PD-Strukturen.

Die Einleitung beschreibt die Hauptaufgabe der Arbeit und zeigt ihre Relevanz. Die Literaturübersicht gibt einen Überblick über die wissenschaftliche und technische Literatur zum CMES-FD und bestätigt die Perspektiven für deren Entwicklung. Der theoretische Teil beschreibt die wichtigsten Parameter und Eigenschaften von CMON-Matrizen und die Bildung eines Farbbildes. Im Abschnitt Technische Berechnungen wird das zweidimensionale Modell der Fotoempfangszelle CMON-FD vorgestellt, die Zahlenwerte der Abhängigkeit der Fotodiodensättigungsspannung von der Beleuchtung ermittelt und der technologische Herstellungsprozess der Zelle CMON-FD beschrieben.

## ЗМІСТ

|   |     |
|---|-----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ .....  | 8   |
| ВСТУП.....  | 9   |
| ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....   | 10  |
| ВИСНОВКИ.....   | 25  |
| ГЛАВА 2. ПРИСТРОЇНА КМОН КРИСТАЛАХ .....  | 25  |
| 2.1. Принцип дії комплементарних метал-оксид напівпровідникових фотодіодних матриць. .... | 25  |
| 2.2. Динаміка переносу зарядів .....  | 30  |
| 2.3. Різновидності КМОН ФД матриць .....  | 34  |
| ВИСНОВКИ.....   | 40  |
| ГЛАВА 3. ДАТЧИКИ ЗОБРАЖЕННЯ НА КМОН МАТРИЦЯХ.....   | 40  |
| 3.1. Кольорове зображення на КМОН-датчиках .....  | 40  |
| 3.2. Параметри та характеристики датчиків зображення .....                                | 47  |
| ВИСНОВОК.....   | 58  |
| ГЛАВА 4. ПРИЛАДОВО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФД КОМІРКИ ФОТОЧУТЛИВИХ КМОН-ФД МАТРИЦЬ ..... | 59  |
| 4.1. Принцип роботи ФД комірки КМОН-ФД матриці .....                                      | 59  |
| 4.2. 2Д-модель структури фотоприймальної комірки КМОН-ФД.....                             | 62  |
| 4.3. Модернізація моделі фотоприймальної комірки КМОН-ФД.....                             | 64  |
| 4.4. Порівняльний аналіз трьох моделей. ....  | 68  |
| 4.5. Кінцева модель структури. ....   | 69  |
| ВИСНОВКИ.....   | 71  |
| ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПО КІНЦЕВІЙ МОДЕЛІ СТРУКТУРИ КМОН-ФД КОМІРКИ.....         | 71  |
| 5.1. Результати двомірного моделювання .....  | 72  |
| 5.2. Результати моделювання світло-сигнальної характеристики .....                        | 74  |
| ВИСНОВКИ.....   | 77  |
| ГЛАВА 6. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПІКСЕЛЯ КМОН ФД МАТРИЦІ .....                            | 77  |
| ВИСНОВКИ.....   | 83  |
| ГЛАВА 7. ЗАВСТОСУВАННЯ КМОН-ФД МАТРИЦЬ .....  | 83  |
| ВИСНОВОК.....   | 88  |
| ГЛАВА 8. СТАРТАП-ПРОЕКТ .....   | 89  |
| ВИСНОВКИ.....   | 91  |
| ВИСНОВОК.....   | 91  |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....   | 92  |
| ДОДАТОК А .....   | 95  |
| ДОДАТОК Б.....  | 97  |
| ДОДАТОК В .....   | 100 |
| ДОДАТОК Г.....  | 103 |
| ДОДАТОК Д .....   | 106 |

|           |      |                |        |      |   |  |  |                   |      |         |  |
|-----------|------|----------------|--------|------|---|--|--|-------------------|------|---------|--|
|           |      |                |        |      | МРП 171.081.017 ПЗ                      |  |  |                   |      |         |  |
|           |      |                |        |      |   |  |  |                   |      |         |  |
| Змн.      | Арк. | № докум.       | Підпис | Дата | Датчики зображення на КМОН-ФД кристалах |  |  | Літ.              | Арк. | Аркушів |  |
| Розроб.   |      | Чирук В.М.     |        |      |   |  |  |                   |      |         |  |
| Перевір.  |      | Шмирьова Л.М.  |        |      |   |  |  |                   | 7    | 110     |  |
|           |      |                |        |      |   |  |  | КПІ, ФЕЛ, ДЕ-81мп |      |         |  |
| Н. Контр. |      | Чадюк В.О.     |        |      |   |  |  |                   |      |         |  |
| Затверд.  |      | Писаренко Л.Д. |        |      | Пояснювальна записка                    |  |  |                   |      |         |  |
|           |      |                |        |      |   |  |  |                   |      |         |  |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

|       |  |
|-------|--|
| МОН   | метал-оксид-напівпровідник                           |
| ПЗЗ   | пристрої з зарядовим зв'язком                        |
| ФПЗЗ  | фоточутливий пристрій з зарядовим зв'язком           |
| ПУ    | Плаваючий вузол                                      |
| НВІС  | надвелика інтегральна схема                          |
| ФСЗЗ  | фоточутлива схема з зарядовим зв'язком               |
| ФД    | фотодіод   |
| КМОН  | комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник  |
| МДН   | метал-діелектрик-напівпровідник                      |
| МФПЗЗ | матричний фоточутливий пристрій з зарядовим зв'язком |
| АЦП   | Аналого-цифровий перетворювач                        |
| ФСЗЗ  | фоточутлива схема з зарядовим зв'язком               |
| ВІ    | Вікно інтересу                                       |



## ВСТУП

Перші багатoeлементні фотоприймачі збиралися з окремих фоточутливих елементів або виготовлялися на одній підкладці шляхом формування окремих фоточутливих областей методами фотолітографії або різання монокристалів [2].

Після появи інтегральної технології стало можливим виготовити матрицю ФД на одному кристалі, в якій для організації зчитування використовувалися ключі на біполярних транзисторах або МОН-транзисторах. Лінійні і матричні МОН-ФД приймачі почали випускатися провідними компаніями (Reticon, Integrated Photomatrix, Hitachi) з 1969 р Перші лінійні МОН-ФД містили 64 пікселя. Однак вже до 1975 р були освоєні лінійні МОН-ФД з числом елементів 256, 512, 768, 1024, 2048, які мають розміри пікселя від 15 до 50 мкм і частоту зчитування вихідного сигналу від 3 до 40 МГц. Матричні прилади мали формат від 32х32 до 100х100 пікселів.

В кінці 70-х років паралельно з розробкою ФПЗЗ телевізійного формату проводилися роботи по розробці МОН-ФД самоскануючих матричних фотоприймачів. У 1982 р вже повідомлялося про розробку МОН-ФД для кольорової камери [6. 7].

Відзначимо, що з'явилася в той час МОН-ФД елементна база була відразу затребувана розробниками систем і знайшла застосування в контрольно-вимірювальних приладах і найпростіших системах розпізнавання зображень [4].

У 1990-х роках технологія КМОН переживала бурхливий ріст. Так наприклад багато технологічних гігантів електронної промисловості, такі як Hewlett-Packard, Atmel, Micron (США), працювали над виробництвом мікросхем статичної та динамічної пам'яті для персональних комп'ютерів на основі технології КМОП. Ступінь інтеграції перевищила мільярд транзисторів на кристалі [12].

Прорив в КМОН-ФД стався в 1993 році у зв'язку з винаходом Еріком Р. Фоссамом технології активний піксель (APS, Active Pixel Sensor) [13]. Вже в 1999 році один з лідерів в області КМОН-ФД з'явилася «інтелектуальна» фотоприймальна НВІС, яка містить фотоприймальну матрицю форматом 352 x 288 активних пікселів, АЦП, аналоговий і цифровий сигнальні процесори [9]. З'являється такий важливий напрям, як аналогова обробка сигналів в кожному пікселі або в групі пікселів, яка дозволяє реалізувати в реальному масштабі часу

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 9    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

класичні методи обробки зображень: стиснення, виділення контурів, точкових цілей і т.д. [10].

Таким чином, можна сказати, що КМОН-ФД НВІС з'явилися в результаті збільшених вимог до побутових, промислових і наукових оптоелектронних системам, прагненню підвищити характеристики технічного, а також завдяки величезному прогресу в області КМОН технології.

На даний час проектування КМОН-ФД НВІС є актуальною темою. Основним у всіх КМОН-ФД є проектування фотоприймальної комірки або, іншими словами, пікселя матриці. Технологічне проектування пікселя використовують для різних цілей: дослідження, удосконалення технології виготовлення, підготовка до масштабного виробництва та інші. Без відповідного програмного забезпечення для виконання приладово-технологічного моделювання не обійтись. Уся робота є дуже клопітливою та багато часу йде на перебір десятків конструктивних варіантів комірок, отже потрібна швидка та ефективна модель комірки, яка одночасно дає можливість оперативного внесення змін в структуру пікселя і отримання точних результатів, при цьому за короткий проміжок часу.

Метою даної роботи є створення та дослідження двовимірної моделі фотоприймальної комірки КМОН-ФД в середовищі приладово-технологічного моделювання Sentaurus TCAD (Synopsys) для цілей промислового моделювання.

## ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Пристрій з перенесенням заряду (ППЗ) можна використовувати в різних системах для збереження, направленої передачі і обробки цифрової і аналогової інформації, а також для сприйняття зорових образів.

Крім функції запам'ятовування цифрової інформації на ППЗ можна реалізувати повний набір логічних функцій. Це призвело до розробки напівсуматора, суматорів і помножувачів цифрових сигналів. На базі цих елементів можна будувати однокристальні спеціалізовані процесори і цифрові фільтри, призначені для вирішення завдань з потоковим алгоритмом обчислень (наприклад, таких, як цифрове перетворення Фур'є, перетворення Гільберта, Адамара і т.д.). Аналіз показує, що такі процесори на ППЗ характеризуються високою швидкістю і малою споживаною потужністю [1].

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 10   |

У оптоелектронній техніці поява ППЗ відкрило принципово нові можливості для створення безвакуумних аналогів відиконів, які були названі фоточутливими схемами із зарядним зв'язком (ФСЗЗ). У цих приладах сфокусоване на кристал зображення перетворюється в адекватну йому картину зарядових пакетів. Ці зарядові пакети скануються (зсуваються) на вихід, утворюючи відеосигнал.

На ППЗ реалізуються лінійні (сприймають один рядок зображення), матричні (сприймають цілий кадр) ФППЗ і ФСЗЗ з тимчасовою затримкою і накопиченням (ТЗН).

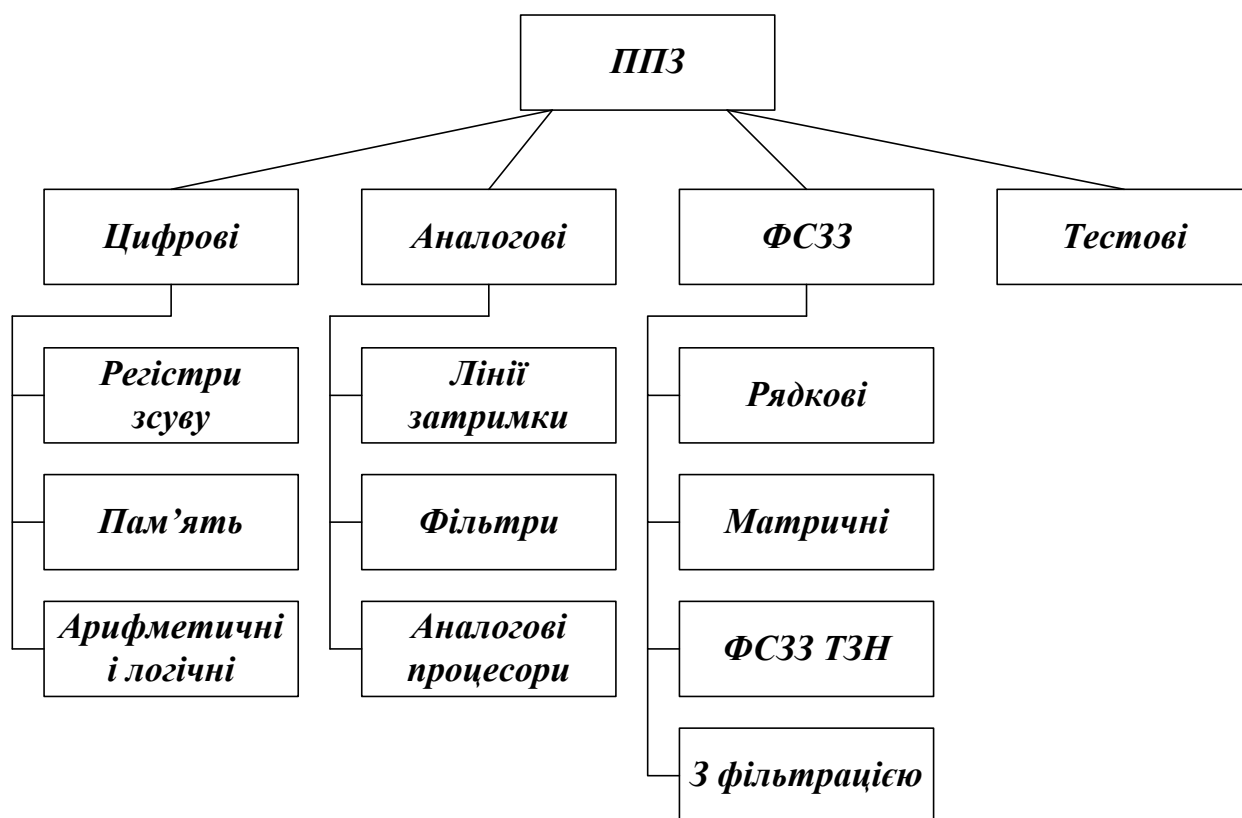


Рис. 1.1. Класифікація ППЗ по функціональним признакам

Так як за допомогою ППЗ можна здійснювати фільтрацію аналогових сигналів, то з'являється можливість на одному кристалі ФСЗЗ формувати фільтр або набір фільтрів, які будуть обробляти відеосигнал, який надходить з ФСЗЗ з метою виділення контурів, фур'є-аналізу, розпізнавання образів і т.д. Ці можливості дуже корисні, так як зазвичай потрібно не вся, а тільки певна інформація від сприйманого зображення.

Поєднання в ППЗ можливостей обробки і зберігання як аналогової, так і цифровий (в тому числі багаторівневої) інформації, наявність оптичного входу,

відносна технологічна простота (обумовлена регулярністю структури) - все це робить ППЗ виключно важливим і перспективним приладом для інформатики майбутнього.

Поява ППЗ дало в руки фізиків чутливий інструмент аналізу властивостей поверхні і приповерхневих областей напівпровідників. Якщо сформулювати на досліджуваній поверхні тестовий ППЗ, то, вимірюючи залежності величини зарядових пакетів і втрат передачі від частоти, світлового потоку, температури, потужності іонізуючого напруги і т.п., можна визначити електрофізичні характеристики поверхні і приповерхневих областей напівпровідника (характеристики поверхневих станів, ефективну рухливість, фоточутливість і т.д.).

Основні області використання ППЗ наведені на діаграмі (рис. 1.1).

### **Типи фотоприймальних матриць**

Фотоприймальна матриця - це пристрій, що складається з світлочутливих елементів, що перетворюють потік падаючих на них фотонів в електричний струм пропорційний цьому потоку, регістрів, ланцюгів посилення. Вироблений фотоприймальною матрицею аналоговий сигнал надходить на відеопроцесор, де і стає звичним для нас зображенням.

В ході дослідження було виділено два основних типи фотоприймальних матриць: ПЗЗ-матриці і комплементарні структури метал-оксид-напівпровідник – матриці (КМОН-матриці).

### **ПЗЗ – матриці**

ПЗЗ-матриця – спеціалізована аналогова інтегральна мікросхема, що складається з світлочутливих фотодіодів, виконана на основі кремнію, що використовує технологію ПЗЗ - приладів із зарядним зв'язком.

ПЗЗ-матриця складається з полікремнію, відокремленого від кремнієвої підкладки, у якій при подачі напруги через полікремнієві затвори змінюються електричні потенціали поблизу електродів (рис. 1.2).

До експонування зазвичай подачею певної комбінації напруг на електроди відбувається скидання всіх раніше утворених зарядів і приведення всіх елементів в ідентичний стан.

Далі комбінація напруг на електродах створює потенційну яму, в якій можуть накопичуватися електрони, що утворилися в даному пікселі матриці в

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 12   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

результаті впливу світла при експонуванні. Чим інтенсивніший світловий потік під час експозиції, тим більше накопичується електронів в потенційній ямі, відповідно тим вищий підсумковий заряд даного пікселя.

Після експонування послідовні зміни напруги на електродах формують в кожному пікселі і поруч з ним розподіл потенціалів, яке призводить до перетікання заряду в заданому напрямку, до вихідних елементів матриці. Згодом процес переносу заряду удосконалювався, і на світ з'явилися ПЗЗ-матриці з буферизацією кадру, з буферизацією стовпців, а також ПЗЗ-матриця з ортогональним перенесенням зображення [4].

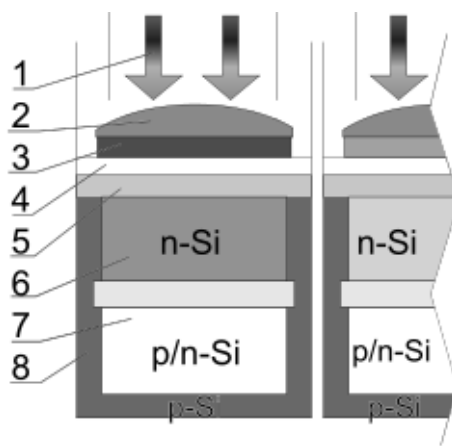


Рис. 1.2. Структура ПЗЗ-матриці

Приклад субпікселя ПЗЗ-матриці з каналом n-типу показаний на рис. 1.3, де 1 – фотони світла, які пройшли через об'єктив фотоапарата; 2 – мікролінза субпікселя; 3 – R червоний світлофільтр субпікселя, фрагмент фільтра Баєра; 4 – прозорий електрод із полікристалічного кремнія або сплаву індія і окислу олова; 5 – оксид кремнія; 6 – кремнієвий канал n-типа: зона генерації носіїв – зона внутрішнього фотоефекта; 7 – зона потенціальної ями (карман n-типа), де збираються електрони із зони генерації носіїв заряду; 8 – кремнієва підкладка p-типу [3].

### Супер ПЗЗ

Головною особливістю технології Супер ПЗЗ було розташування і форма фотосенсорів. Японською компанією Fujifilm була розроблена так звана Супер ПЗЗ -матриця. На відміну від уже звичної прямокутної структури розташування фотодіодів, що утворюють одиничний елемент зображення - піксель, в упер ПЗЗ-матриці фотодіоди мають восьмикутну форму і розташовуються один щодо одного під кутом 45° (рис. 1.3). Завдяки такій «мобільній» структурі фотодіоди стоять

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 13   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

ближче один до одного, тому збільшилася відносна площа, яку вони займають (а значить, збільшилася ефективна площа поверхні, з якої знімається світло). В результаті підвищується чутливість такої матриці, тобто підвищується рівень сигналу з одиниці площі ПЗЗ-матриці і, як наслідок, знижуються паразитні шуми.

Ефективна поверхня збільшується в 1,6 рази, поліпшується передавання кольору і співвідношення «сигнал/шум», розширюється динамічний діапазон, зменшується витрата енергії, збільшується чутливість і роздільна здатність зображень. Фотографія, що отримується з такою супер-ПЗЗ-матрицею з роздільною здатністю в 1,3 мегапікселя, за якістю аналогічна одержуваної з традиційною «квадратної» матриці з роздільною здатністю в 2,1 мегапікселя.

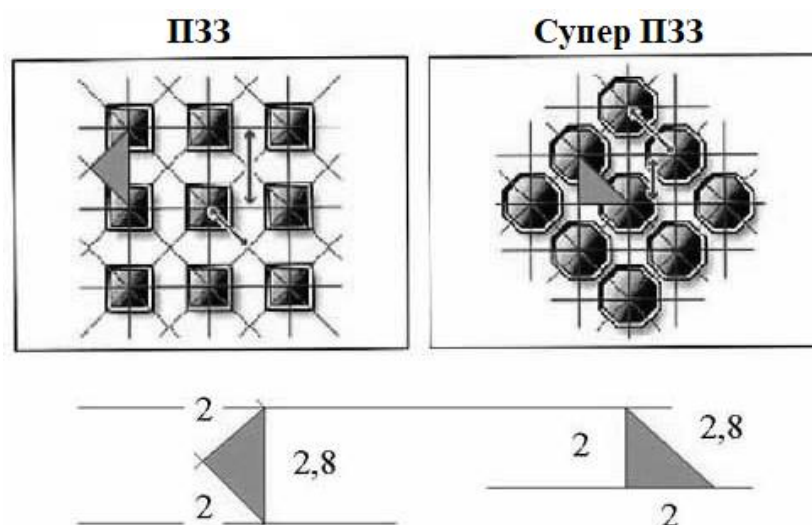


Рис. 1.3. Порівняння фотосенсорів ПЗЗ і Супер ПЗЗ

### Супер ПЗЗ HR, SR

Супер ПЗЗ HR зберегла ту ж структуру розташування пікселів. Цей висновок можна зробити, розглядаючи рис. 1.4. Гонка по збільшенню кількості фотодіодів в матриці привела до зменшення розмірів самих пікселів і збільшення їх кількості, при цьому розміри самих чіпів залишилися колишніми.

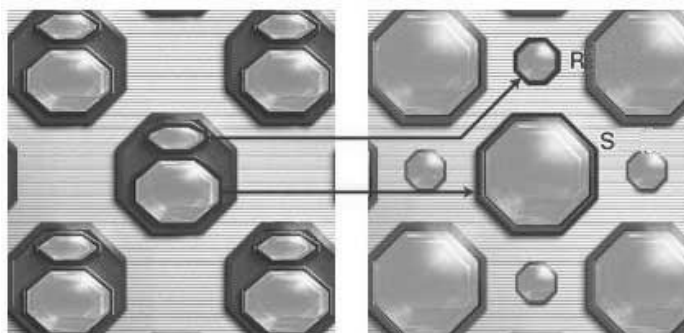


Рис. 1.4. Порівняння Супер ПЗЗ HR и Супер ПЗЗ SR

У новій Супер ПЗЗ HR кожен піксель був мініатюризованим настільки, що вдалося отримати 6,63 млн. пікселів на 1/1,7" чипі ПЗЗ. Камери, побудовані на основі таких матриць, дозволяють отримувати зображення розміром 12,3 млн. пікселів. Версія Супер ПЗЗ HR розміром 1/2,7" містить 3,14 млн. пікселів і дозволяє отримувати зображення розміром 6,0 млн. пікселів. На додаток до збільшення роздільної здатності була також підвищена максимальна чутливість нової матриці в порівнянні з попереднім поколінням Супер ПЗЗ [5]. Вона впритул наблизилася до можливостей великих сенсорів, які до цього використовувалися переважно в дзеркальних камерах.

Зазвичай цифрові камери мають труднощі при відтворенні високо контрастних зображень, в яких містяться і темні, і світлі області, при цьому в темних областях падає детальність, а в світлих - відбуваються спотворення, в результаті яких частина зображення стає однорідно світлого тону. Технологія Супер ПЗЗ була розроблена з метою збільшити площу фотодіодів в кожному пікселі і тим самим підвищити чутливість і розширити динамічний діапазон.

Нова Супер ПЗЗ SR четвертого покоління розширює динамічний діапазон майже в чотири рази в порівнянні з попередницею - Супер ПЗЗ попереднього покоління, в результаті чого стає доступним широкий і плавний динамічний діапазон, без втрат на темних ділянках і білизни на світлих. Супер ПЗЗ SR поєднує в собі великі високочутливі S- пікселі і більш дрібні, відповідно менш чутливі, R пікселі (рис. 1.5). Об'єднуючи інформацію з обох типів пікселів в загальну композицію кадру, Супер ПЗЗ SR надає можливість отримати високу чутливість і розширений динамічний діапазон.

Основними перевагами технології є:

- Здатність боротися з ефектом відбілювання;
- Захоплює більш докладні відомості про виділені області;
- Дозволяє впевнено знімати навіть в дуже яскравих умовах;
- Велика роздільна здатність в більш темних областях тіні;
- Збільшена широта експозиції, що забезпечується датчиком, означає, що технологія більш прощає неправильну експозицію [5].

Не один, а два фотодіода захоплюють інформацію на одній і тій же області зображення (рис. 1.5). Чутливий первинний фотодіод реєструє основний обсяг

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 15   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

світла, відбитий від об'єкта (аналогічний звичайному супердіодному фотодіоду Супер ПЗЗ), в той час як вторинний фотодіод захоплює виділену інформацію з тієї ж частини зображення. Оскільки він встановлений з меншою чутливістю, ніж первинний фотодіод (іншими словами, записує більш темне зображення), вторинний фотодіод здатний «бачити» додаткові деталі в яскравих областях, які недоступні звичайним фотодіодам.

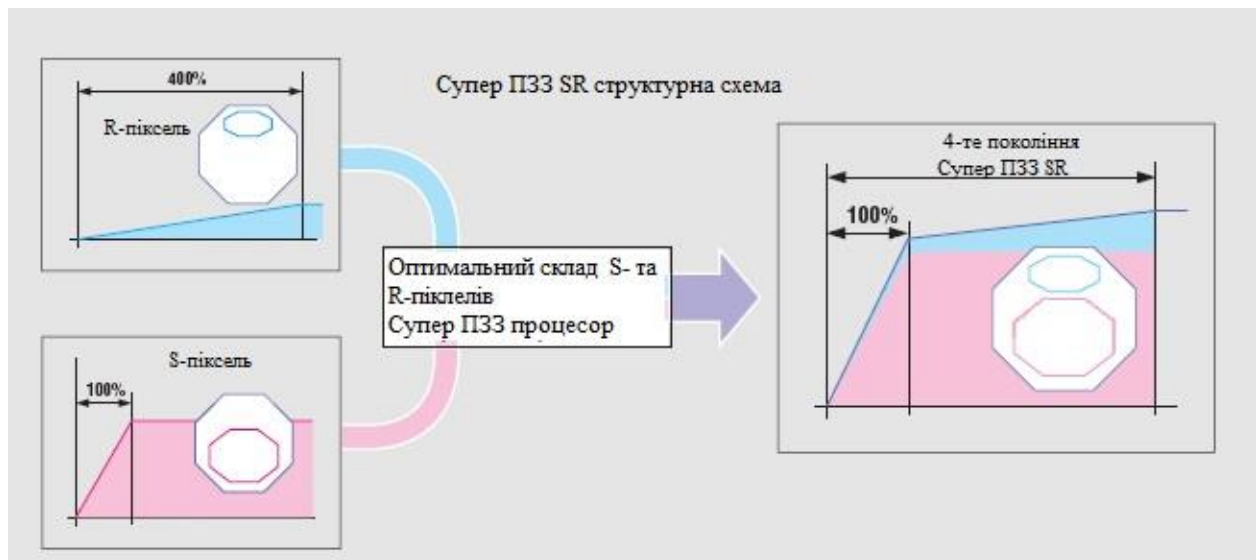


Рис. 1.5. Структурна схема Супер ПЗЗ SR

Пояснення динамічного діапазону: на відміну від людського ока, який можна швидко адаптувати до різної інтенсивності світла, властиво контрастній картині, фотографічні носії (плівкові та цифрові датчики) обмежені необхідністю світла. Якщо камера правильно відображає яскраві області, тіньові області затемнюються, а деталі губляться. І навпаки, якщо камера правильно відображає тіньові області, яскраві області з'являться як згорілі білі. Камера з хорошим динамічним діапазоном хоче володіти гнучкістю експозиції, щоб виставити обидві крайнощі і правильно відобразити як яскраві, так і темні області. Супер ПЗЗ SR пропонує вирішення цієї проблеми, змішуючи інформацію з низькочутливих і високочутливих пікселів [6].

### КМОН – матриці

КМОП-фотоприймачі з'явилися в результаті розвитку фотодіодних матриць, координатна вибірка в яких здійснювалася за допомогою N-канальних МОН-дешифраторів і регістрів, сформованих на тому ж кристалі. Основний недолік таких N-канальних МОН-фотодіодних матриць - мала амплітуда вихідних сигналів і високий рівень шумів. Це обумовлено зчитуванням сигнальних зарядів на шини



стовпців, ємність яких велика і пропорційна числу пікселів в стовпці, тобто пропорційна формату матриці. І оскільки КМОН-фотоприймачі істотно програвали ФПЗЗ, їх розробки були припинені.

Переворот в технології КМОН-сенсорів стався, коли в лабораторії NASA успішно реалізували *Active Pixel Sensors (APS)* – сенсори з активними пікселями. APS додає до кожного пікселя транзисторний підсилювач для зчитування, що дає можливість перетворювати заряд в напругу прямо в пікселі. За рахунок транзисторного підсилювача в кожному активному пікселі ємність зчитування і ємність вертикального стовбця виявляються розділеними, що дає ємність зчитування того ж порядку, що і в ПЗЗ.

Застосування переднього посилення сигналу дозволяє домогтися еквівалентного коефіцієнта перетворення на порядок більшого, ніж у ПЗЗ, що позитивно позначається на шумових характеристиках фотоприймача. КМОН-фотоприймачі можна розділити на два типи:

- приймачі з внутрішньокристальним процесором, що дозволяє програмувати різні завдання обробки зображення;
- приймачі з обробкою сигналів в кожному активному елементі.

Приклади КМОН-фотоприймачів першого типу - фотоприймальні NBIC фірм Cypress, Micron-Aptina, Toshiba і ін. Процесор фотоприймача фірми Cypress (випускається з 2008р.) Містить 1280 x 1024 активних елементів. Він дозволяє задавати розміри і розташування зони спостереження, частоту кадрів, час експозиції, коефіцієнт посилення вихідного сигналу, має 12 вбудованих LVDS-портів. Обробка сигналів в кожному активному елементі дозволяє отримувати високе відношення сигнал/шум, малу споживану потужність і обробляти зображення в процесі його інтегрування. Однак досягається це за рахунок збільшення числа транзисторів в елементі. В результаті зменшується фактор заповнення сенсорного поля (Fill Factor) і знижується фоточутливість приймача. У фірмі Silicon Architects (США) вже реалізовані дослідні зразки КМОН-фотоприймачів другого типу з форматом 640x512 елементів і послідовним багатоканальним АЦП в кожному елементі.

Сучасні КМОН-фотоприймачі - це, перш за все, приймачі з внутрішньокристальним процесором. Вони містять матрицю активних

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 17   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

фоточутливих елементів, схеми управління, аналогові підсилювачі зчитування на виході кожного стовпчика, мультиплексор, АЦП, блок цифрової обробки і ряд інших цифрових блоків. На рис. 1.6 представлена структурна схема однокристалної цифрової матриці. У таких КМОН-матрицях схеми управління можуть реалізовувати довільну координатну вибірку сигналів, що значно розширює можливості фільтрації і обробки (в тому числі паралельної) сигналів зображення.

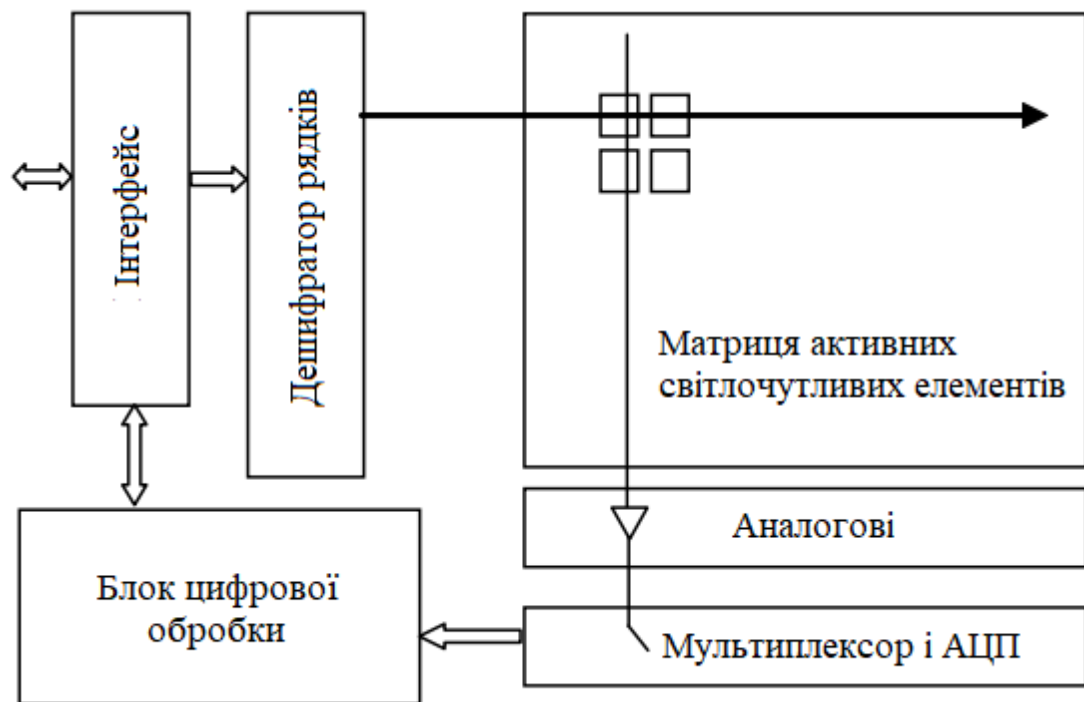


Рис. 1.6. Структурна схема КМОН-фотоприймача.

Друга особливість КМОН-фотоприймачів пов'язана з можливістю паралельного зчитування елементів кожного стовпця з їх подальшою цифровою обробкою. У цьому випадку кількість АЦП буде відповідати кількості стовпців, наприклад, в КМОН-фотопремніке типу МТ9М413 використовується 1 280 10-розрядних АЦП. Блок цифрової обробки для КМОП-мікросхеми можна розглядати як процесор, який виконує алгоритми паралельної потокової обробки сигналів рівня стовпців - рядків. Всі питання алгоритмізації і побудови паралельних систем обробки сигналів можна застосувати й для реалізації такого процесора.

КМОН-технологія дозволяє реалізувати велику кількість функцій безпосередньо на кремнієвому кристалі. Крім перетворення фотонів в електрони і їх передачі, датчик КМОН може обробляти зображення, виділяти контур,

мінімізувати шуми і виконувати аналого-цифрові перетворення. КМОН матричні фотоприймачі навіть на погляд відрізняються від ПЗЗ тим, що не вся площа кристала зайнята матрицею - частина площі витрачається на управління розгорткою, на безліч АЦП і інтерфейси каналів зв'язку. Відбувається зрощування фотоприймача з пристроєм обробки.

У технології КМОН-ФД матриць, у кожного активного пікселя з'являється свій зчитуючий транзисторний підсилювач, який перетворює заряд в напругу безпосередньо на пікселі і створює можливість довільного доступу до пікселю, аналогічно оперативної пам'яті (рис. 1.8).

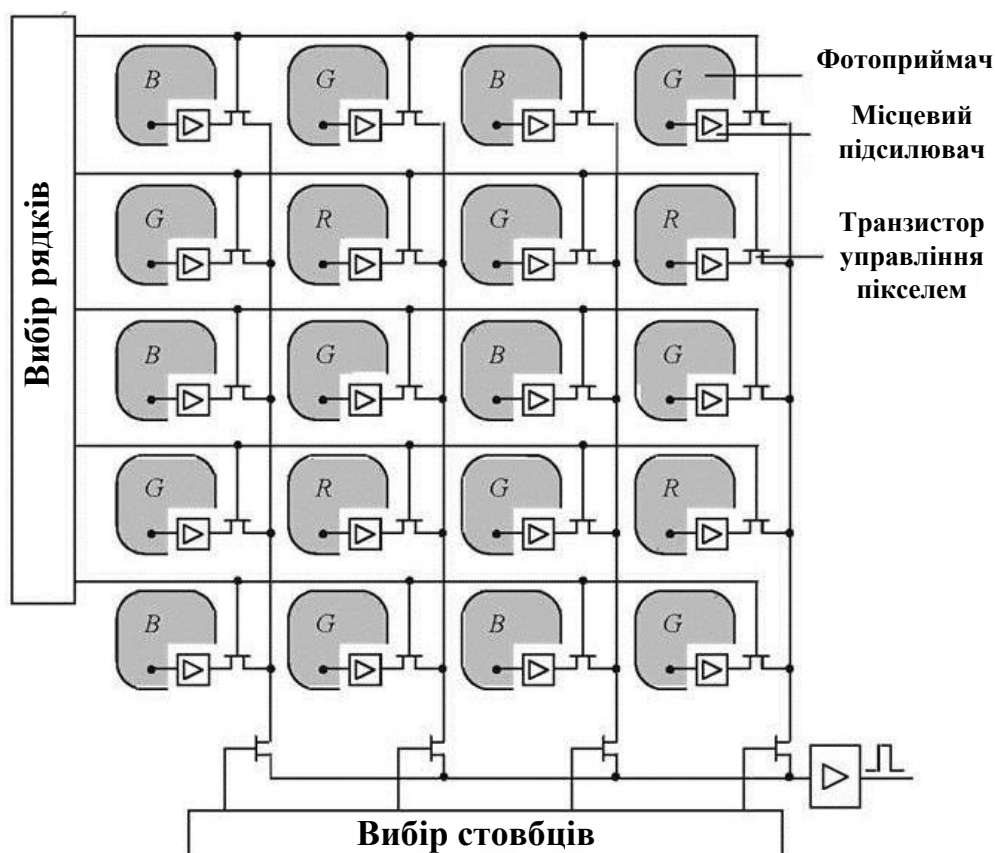


Рис 1.8. КМОН – архітектура: G – зелений фільтр, R – червоний фільтр, B – синій фільтр.

Зчитування заряду з активних пікселів відбувається за паралельною схемою, при якій сигнал з кожного пікселя або колонки пікселів зчитується безпосередньо. Такий довільний доступ дозволяє КМОН-датчику зчитувати не всю матрицю цілком, а відбирати групи пікселів. Цей метод отримав назву віконного зчитування (англ. *windowing readout*), тобто при захопленні зображення КМОН-датчик може зменшити його розмір, що істотно збільшує швидкість отримання зображення.

Крім підсилювачів, розташованих у кожного пікселя, схеми підсилення можуть бути розташовані в будь-якій області кристала, що дозволяє створювати кілька каскадів посилення по всьому датчику. Однак додаткові елементи, розміщені на кристалі, створюють перешкоди (струми витоку транзисторів, діодів, залишковий заряд). Схематично принцип роботи датчика наведено на рис. 1.9.

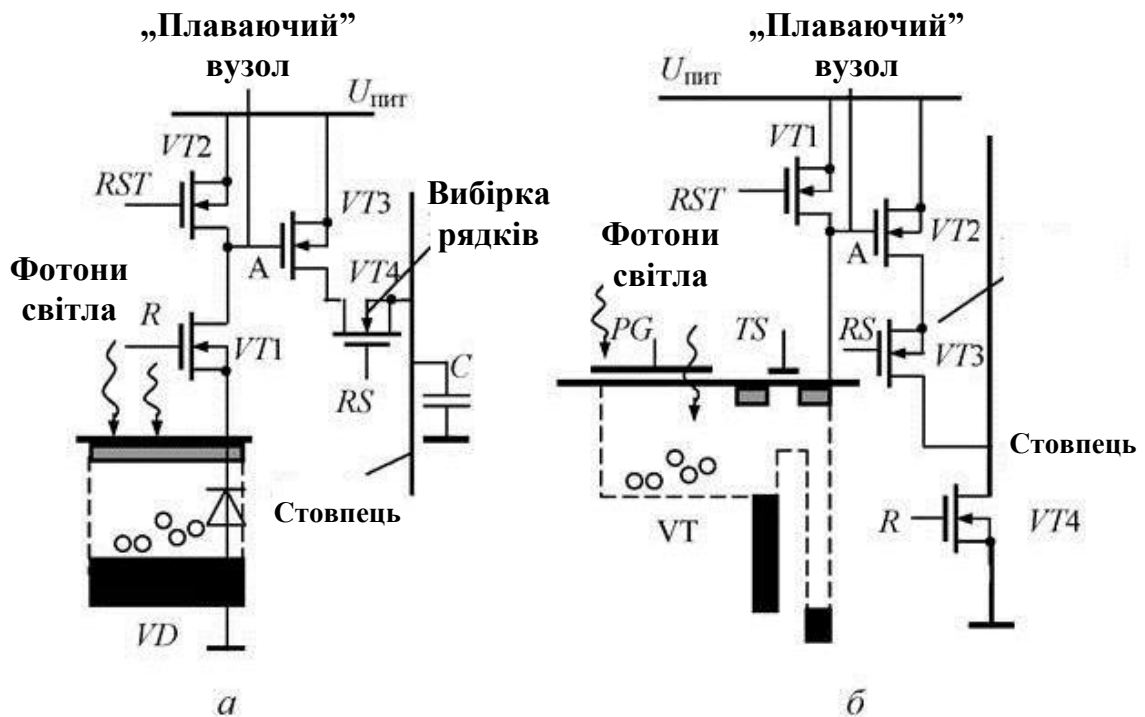


Рис. 1.9. КМОН архітектура з фотодіодом (а) і фото затвором (б)

Принципова особливість такої архітектури в тому, що в кожному пікселі крім фоточутливого елемента (фотодіода, рис. 1.9, а чи фотозатвора, рис. 1.9, б) знаходиться активна транзисторна схема посилення сигналу фотодатчика. Активний елемент датчика утворений фотодіодом VD або фототранзистором VT і чотирма транзисторами VT1...VT4, які керують процесом отримання та зчитування потенціалу зображення, створеного світловим потоком і накопиченого фотодіодом або фототранзистором. У режимі накопичення фотодіодом фотогенерованих електронів (інформація про зображення) керуючий імпульс RST, що надходить на базу транзистора VT1, дорівнює нулю, потенціал на фотодіоді зменшується, а потенціал загальної точки з'єднання транзисторів VT1, VT2 і VT3 змінюється за значенням («плаваючий» вузол). У режимі вибірки інформації короточасний керуючий імпульс RST надходить на затвор транзистора VT2 і дорівнює 1 VT2

відкривається і потенціал «плаваючого» вузла відновлюється до рівня напруги живлення. Потім на всі активні елементи вибраного рядка подається імпульс  $R$  на затвор транзистора  $VT\ 1$ , відкриваючи його. Накопичений фотодіодом потенціал заряду передається в точку  $A$ . Для подальшої вибірки інформації керуючий імпульс  $RS=1$  (вибірка рядка) подається транзистор  $VT4$ . Він відкривається і спільно з транзистором  $VT3$  утворює емітерний повторювач. На шину стовпця подається посилений за потужністю потенціал, накопичений фотодіодом. На шини стовпців передаються лічені потенціали всіх елементів вибраного рядка. Дешифратор стовпців послідовно вибирає потенціали шин і передає їх на схему аналогової обробки сигналів окремих елементів матриці. Після закінчення зчитування сигнал  $RS$  роблять рівним 1, транзистор  $VT4$  закривається. Починається накопичення потенціалу зарядів наступного кадру зображення. У ПЗЗ-датчиках фоточутлива область займає більшу частину площі активного елемента, що визначається фактором заповнення.

У КМОН-датчиках фоточутлива область займає лише частину площі (30-35%), а решта площі зайнята шинами і КМОН-транзисторами. Для підвищення фоточутливості КМОН-датчика використовуються мікролінзи, які фокусують більшу частину світлового потоку на фотодіод. Це дозволяє отримати значення повного кадру при перпендикулярному напрямку світлового потоку до 80%, а за інших умов – До 45-50%.

### **Порівняння КМОН з пристроями з зарядовим зв'язком**

Головним недоліком КМОН- технології є перешкоди, що виникають із-за додавання додаткових елементів на чіп. Це транзисторні та діодні розсіювання, ефект залишкового заряду і багато інших. Усуненням таких перешкод розробники займаються вже давно. В даний час розробники КМОН-датчиків навчилися безпосередньо на чіпі усувати шум тіньового струму з заряду перед тим, як передати його з сенсора.

Подібно ПЗЗ, КМОН-сенсори використовують масив фотодіодів для перетворення світла в електричний сигнал. Цей маленький електричний заряд, що генерується фотодіодом, накопичується в конденсаторі. Заряд занадто слабкий, щоб бути використаним для самостійного використання, і потребує посилення до прийняттого для роботи з ним рівня.

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 21   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

Основною відмінністю між ПЗЗ і КМОН-сенсором - це спосіб перетворення накопичених зарядів в сигнали, які підлягають обробці. ПЗЗ-матриця зчитує пікселі безперервно. Збережені заряди з кожного рядка фактично зсуваються до наступного рядка (так звана «зарядовий зв'язок») (рис.1.13) і по загальній шині заряди виводяться послідовним потоком даних. Рівень напруги кожного пікселя в послідовному потоці підвищується підсилювачем, встановленому на чіпі перед виходом, і далі направляється до зовнішнього або внутрішнього аналого-цифровому перетворювача (АЦП), де сигнали перетворюються в масив байтів, з яких створюється зображення.

Кожен піксель в КМОН-сенсорі має свою власну підсилювальну схему (рис.1.10 - МОН-активний піксель), тому посилення сигналу відбувається ще до зчитування зображення.



Рис.1.10. Порівняння ПЗЗ-елемента , МОН-пасивного пікселя і МОН-активного пікселя.

Одержаний сигнал досить потужний, щоб бути використаним без будь-якого подальшого посилення. На відміну від ПЗЗ, КМОН-сенсори часто мають додаткову схему обробки зображення, включаючи аналого-цифрові перетворювачі і процесори стискання прямо на чіпі, роблячи процес зчитування й обробки зображення більш швидким і простим. Все це виражається в менш потужному чіпі, збільшеній надійності, зменшеному споживанні енергії та більш компактному дизайні [11].

Перерахуємо ті функціональні можливості, які надаються за рахунок використання сучасних КМОН-фотоприймачів [2, 25, 79, 80].

1. Можливість адаптації КМОН телекамер до зміни не тільки рівня освітленості, але інших властивостей сюжету динаміки спостережуваних об'єктів і

їх числа. Так, однією з найбільш затребуваних функцій є завдання розміру і положення фрагмента зображення, з якого відбувається зчитування відеосигналу. При цьому реалізується обмін поля зору і числа елементів фотоприймача на частоту кадрів. При зменшенні розмірів фрагмента в відповідне число разів зростає кадрова частота. Багато сучасних КМОН сенсори дозволяють задати розміри і положення фрагмента з точністю до чотирьох пікселів.

2. Координатне зчитування дозволяє комбінувати режими міжрядкове / прогресивне зчитування. Так, у відеокамері, при відеозаписі КМОН-фотоприймач може працювати в міжрядковому режимі зі стандартним розкладанням, а при зчитуванні розкладання може змінюватися на прогресивне.

3. Нова технологія формування кольорового зображення Foveon, заснована на різній глибині проникнення видимого випромінювання в глибину кремнію. Так, фотони синього випромінювання поглинаються в поверхневому шарі, зеленого випромінювання глибше, а червоного в глибині кремнію [79]. У КМОН ФД сенсорах існує можливість розташувати три фотодіоди один над одним і, тим самим, здійснити поділ кольору. Кожен з фотодіодів поглинає свою частину спектрального діапазону. При цьому досягається цілий ряд переваг в порівнянні з відомими методами кольороподілу, такими як використання кольоро-подільних призм або світлофільтрів.

Технологія Foveon забезпечує 100% -е використання світлового потоку, тому що кожен з фотонів видимого діапазону поглинається в одному з фотодіодів, а також повну роздільну здатність в червоному, зеленому і синьому.

4. У КМОН-фотоприймачах, також як і в матричних ПЗЗ може бути реалізований режим електронного затвора для поліпшення якості передачі динамічних зображень. Однак в більшості КМОН ФП реалізується так званий біжучий електронний затвор. Його особливістю є те, що зчитування в КМОН-фотоприймачі здійснюється по рядках. При цьому час накопичення в різних рядках хоч і однаково по тривалості, але зміщений між собою. Це призводить до того, що рухомі об'єкти хоч і не відчують динамічного змазування, однак спотворюються геометрично. Так, якщо круглий об'єкт рухається по зображенню зверху вниз, у напрямку зчитування рядків, то його зображення перетвориться в еліпс, витягнутий по вертикалі. Вертикальні лінії, що рухаються в горизонтальному

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 23   |

напрямку, виявляються похилими. Наявність таких спотворень особливо помітно при зменшеному часу накопичення і є ще одне проблемою застосування КМОН-фотоприймачів.

5. Однією з нових особливостей відеосистем на кристалі є можливість реалізації різноманітних алгоритмів зчитування. Саме таке розмаїття зводить етап розгортки зображень в відеосистемах на кристалі в ранг мікропрограмування експерименту. Реалізація всіляких видів розгортки відкриває шлях істотної економії ємності пам'яті оперативних запам'ятовуючих пристроїв, необхідних при фільтрації зображень за допомогою так званих «багатеlementних апертур». Крім того, складна форма розгортки може істотно спростити операцію збільшення площі зони накопичення, необхідну для обміну роздільної здатності системи на чутливість. Зокрема, для додаткової просторової обробки, наприклад, усереднення декількох елементів зображення або медіанної фільтрації, при традиційній прогресивної розгортці потрібні додаткові елементи аналогової або цифрової пам'яті. Так звана розгортка Z-сканування дозволяє проводити просторове усереднення груп елементів  $2 \times 2$ ,  $4 \times 4$ ,  $8 \times 8$  без застосування додаткових пристроїв, що запам'ятовують.

### **Області застосування ПЗЗ- та КМОН-матриць**

Сучасні ПЗЗ-датчики мають високі характеристики, малу потужність споживання, малі габарити. Вони широко використовуються в системах масового виробництва (стільникових телефонах, цифрових фотоапаратах) і системах, де вимагаються високі характеристики сенсора (у професійній фотоапаратурі, науковому, медичному, військовому т.ін. устаткуванні).

Широке поширення знаходять лінійки ПЗЗ для зчитування одновимірних зображень (наприклад, штрих-коди), в системах, де є механічна розгортка по одній координаті. Прості приклади - телефакс і сканер. Використовують ПЗЗ пристрої для спостереження за космічними тілами.

Реальною альтернативою ПЗЗ є КМОН датчики (комплементарні метал-оксидні-напівпровідникові датчики) зображення, що поєднують на одному кристалі світлочутливу матрицю і повну обробку аналогового сигналу (включаючи аналогово-цифровий перетворювач), наслідком чого є простота застосування та

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 24   |



низька вартість розробки і виробництва різних відеосистем. Датчики цього типу безперервно удосконалюються і вже витісняють ПЗЗ у різних областях: системи відеонагляду/безпеки, медичні пристрої, системи технічного зору тощо. Проте сучасні ПЗЗ матриці володіють більш високими характеристиками і тому завжди будуть використовуватися там, де тільки вони зможуть забезпечити необхідну якість зображення.

## **ВИСНОВКИ**

В ході дослідження було виділено два основних типи фотоприймальних матриць: ПЗЗ-матриці і комплементарні структури метал-оксид-напівпровідник – матриці (КМОН-матриці). Розвиток ПЗЗ-матриць не стоїть на місці і тому розробляють нові конструкторські рішення (Супер ПЗЗ HR, SR), для підвищення чутливості і розширення динамічного діапазону. Сучасні КМОН-фотоприймачі – це приймачі з внутрішньокристальним процесором. Вони містять матрицю активних фоточутливих елементів, схеми управління, аналогові підсилювачі зчитування на виході кожного стовпчика, мультиплексор, АЦП, блок цифрової обробки і ряд інших цифрових блоків.

Основні переваги КМОН-матриць над ПЗЗ-матрицями:

- можливість піксельно задавати розміри і положення фрагменту зображення;
- нова технологія формування кольорового зображення Foveon, яка забезпечує 100 відсоткове використання світлового потоку;
- реалізації різноманітних алгоритмів зчитування, що спрощує операцію збільшення зони накопичення.

На даний час ведуться розробки КМОН-матриць з активними пікселями. Нові розробки КМОН-матриць направлені на покращення основних параметрів: динамічний діапазон, експлуатаційні параметри, характеристики, зменшення шумів.

## **ГЛАВА 2. ПРИСТРОЇНА КМОН КРИСТАЛАХ**

### **2.1. Принцип дії комплементарних метал-оксид напівпровідникових фотодіодних матриць.**

Фоточутливі КМОН ФД НВІС містять матрицю активних фоточутливих елементів (активних пікселів), схеми управління, аналогові підсилювачі зчитування

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>МРП 171.081.017 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 25   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

на виході кожного стовпчика, АЦП і ряд інших цифрових блоків (рис.2.1). У таких КМОН ФД матрицях схеми управління можуть реалізовувати довільну координатну вибірку сигналів, що значно розширює можливості фільтрації і обробки (в тому числі паралельної) сигналів зображення. Завдання виділення вікна інтересу (ВІ), в якому розташована мета, і стеження за нею вирішуються шляхом зчитування сигналів тільки необхідних елементів. А оскільки зазвичай ВІ займає невелику частину кадру, швидкість зчитування, в порівнянні з ФПЗЗ, в яких необхідно зчитувати весь кадр, може бути значно збільшена.

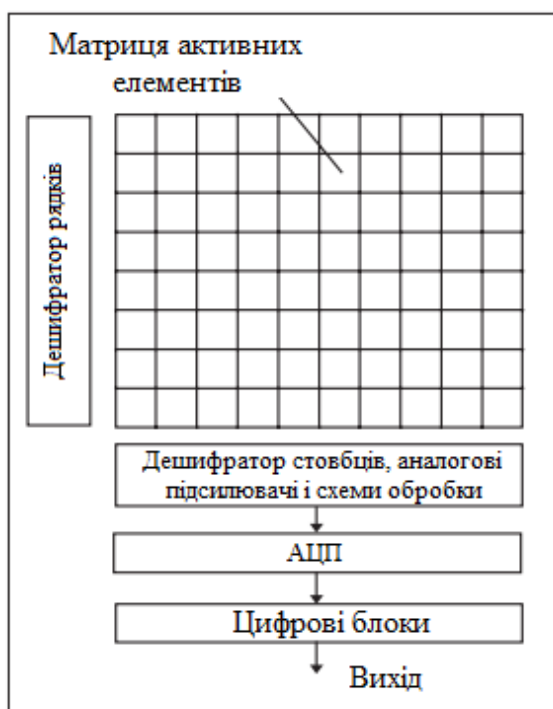


Рис.2.1. Фоточутлива КМОН-ФД матриця

Активний елемент утворений фотодіодом (ФД) і чотирма транзисторами (рис.2.1), які виконують функції зчитування заряду, накопиченого фотодіодом (транзистор V1), відновлення вихідного напруги (V2), входу стокового повторювача (V3) та вибірки рядків (V4). Витік транзистора V4 підключений до шини стовпця [11]. У режимі інтегрування сигналів зображення імпульс R, що подається на транзистор V2, дорівнює нулю. Фотодіод накопичує фотогенеровані електрони, і в міру їх накопичення потенціал діода зменшується.

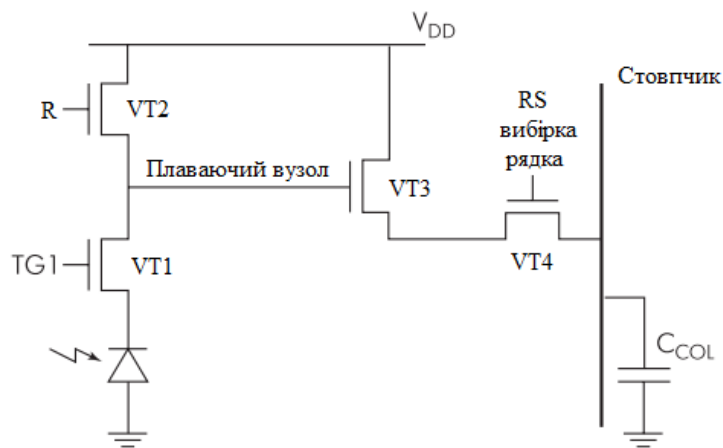


Рис. 2.2. Схема активного пікселя

В результаті потенціал загального вузла з'єднання транзисторів V1, V2 і V3 виявляється плаваючим (плаваючий вузол). У режимі вибірки на транзистор V2 надходить імпульс відновлення  $R = 1$ , V2 відкривається і потенціал плаваючого вузла відновлюється до вихідного рівня. Потім на всі активні елементи вибраного рядка подається імпульс  $TG1 = 1$ , який надходить на затвор транзистора V1, відкриваючи його. Накопичений фотодіодом сигнальний заряд передається в плаваючий вузол. Після приходу імпульсу вибірки рядка  $RS = 1$  відкривається V4. Транзистори V3, V4 і загальний навантажувальний транзистор стовбця (на малюнку не показаний) утворюють стоковий повторювач, і на шину стовбця надходить посилений по потужності сигнал фотодіода. Коефіцієнт передачі по напрузі стокового повторювача близький до одиниці.

На шини стовпців передаються зчитані сигнали всіх елементів вибраного рядка. Дешифратор стовпців послідовно вибирає сигнали шин і передає їх на схему аналогової обробки сигналів окремих активних елементів матриці. Після закінчення режиму зчитування сигнал  $RS = 0$ , і V4 закривається. Починається накопичення зарядів наступного кадру зображення. Процеси накопичення і зчитування зарядів ФПЗЗ і КМОН ФД різні. У ФПЗЗ фоточутлива область займає більшу частину площі активного елементу (в спеціальних структурах - всю його площу). Тому відношення площі фоточутливої області до повної площі елемента, або фактор заповнення (Fill Factor - FF), може досягати 100%. У КМОН ФД фоточутлива область займає лише частину площі фоточутливого елемента, тоді як решта площі зайнята шинами і КМОН транзисторами. Тому фактор заповнення і

фоточутливість КМОН ФД значно нижче (30-35%), ніж у ФПЗЗ.[10]

Для підвищення фоточутливості КМОН ФД використовуються мікролінзи (технологія, освоєна раніше для ФПЗЗ), які фокусують більшу частину падаючого світла на фотодіоди. При перпендикулярному напрямку падаючого світла це дозволяє підвищити FF до 80%. Однак для світла, що падає під іншими кутами, ефективність застосування мікролінз різко падає, і реальне значення FF становить лише 45-50%. Інша причина низької фоточутливості КМОН ФД - фіксована, неоптимальна структура ФД. Це пов'язано з тим, що стандартна КМОН технологія дозволяє формувати р-п перехід діода на глибині 0,25 мкм. У ФПЗЗ глибина залягання об'ємного каналу більше, і для забезпечення максимального збору фотогенерованих носіїв її можна оптимізувати. Проблема збільшення фоточутливості КМОН ФД вирішується шляхом виготовлення структур із збільшеною глибиною залягання збідненого шару (так званих "проколотих" - pinned - структур), що, однак, вимагає проведення додаткових технологічних операцій.

#### **Елемент з фоточутливим затвором**

Після заміни фотодіода фоточутливим затвором, досягли усунення шуму відновлення в фотодіодній матриці. Знееровані заряди накопичуються в потенціальній ямі, під фоточутливим затвором.

Для усунення шуму процесу відновлення в КМОН ФД було запропоновано замінити фотодіод фоточутливим затвором, в потенціальній ямі якого накопичуються фотогенеровані сигнальні заряди (рис.3). В режимі зчитування на затвор транзистора V1 подається відкриваючий його імпульс відновлення R1. Потенціал плаваючого затвора відновлюється до вихідного рівня. Наступний імпульс передачі відкриває додатковий затвор, накопичений сигнальний заряд перетікає в плаваючий вузол, і потенційна яма фоточутливого затвору звільняється. Потенціал вузла знижується на величину заряду.[11]

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 28   |

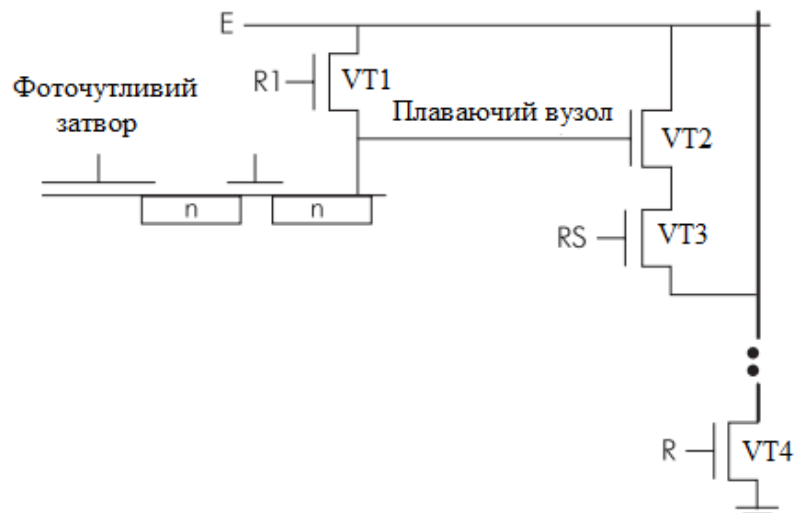


Рис. 2.3. Піксель з фоточутливим затвором

Така схема дозволяє виконувати подвійну кореляційну вибірку (ПКВ), яка практично і усуває шум процесу відновлення. У цьому випадку після відновлення плаваючого потенціалу вузла на затвор транзистора V3 подається відкриваючий його імпульс вибірки рядка  $RS = 1$ . Початкова напруга на затворі транзистора V2 (до якого входить і шум відновлення) через стоковий повторювач передається на шину стовпця і запам'ятовується на її виході. При надходженні на плаваючий вузол сигнального заряду напруга на транзисторі V2 знижується на величину надійшого заряду, і це напруга також передається на вихід шини стовпчика. В результаті вихідний сигнал являє собою різницю значень напруги транзистора V2, що і дозволяє усунути шум відновлення. Недолік схеми з фоточутливим затвором - зниження фоточутливості із-за меншої, в порівнянні з фотодіодом, прозорості затвора і, відповідно, коефіцієнта заповнення.

### Елемент з сполученим управлінням

З метою зменшення числа транзисторів активного елемента і організації прогресивного процесу зчитування фахівці компаній Kodak і Motorola розробили елемент з сполученим управлінням [12]. Він містить загальні на два активних елемента відновлюючий транзистор V3 і стоковий повторювач на транзисторах V4 і V5, який послідовно передає на шину стовпця сигнали двох сусідніх фотодіодів (рис.4).

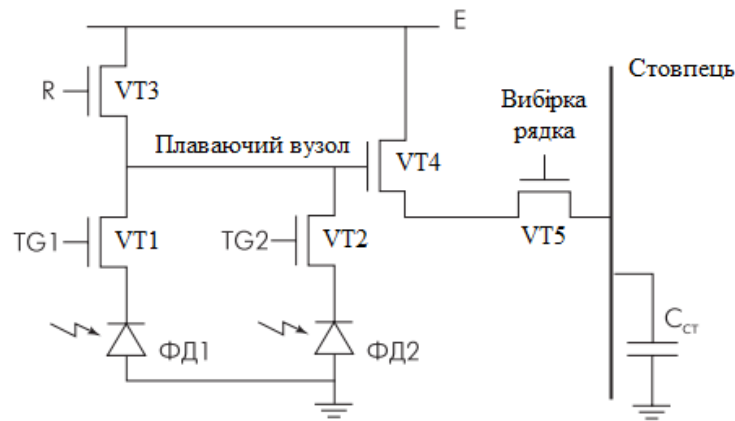


Рис. 2.4. Електрична схема елементу з сполученим управлінням

Два додаткових транзистора зв'язку - V1 і V2 - виконують функцію адресації ФД. У режимі інтегрування фотодіоди накопичують сигнальні заряди. При відкриванні транзистора зв'язку V1 сигнал першого ФД передається в загальну для двох фоточутливих елементів дифузійну область і потім через стоковий повторювач - на вихід шини стовпчика. Потенціал ФД1 відновлюється, і V1 закривається. Відмикається транзистор V2, і на вихід надходить сигнал ФД2. Таким чином, елемент з поєднаним управлінням містить п'ять керуючих транзисторів і два фоточутливих елементи. Така схема використовується в цифровому КМОП ФД матриці форматом 1280x1024 елементів.[12]

## 2.2. Динаміка переносу зарядів

Як і в матричних ПЗЗ, світлочутливим пікселем в КМОН сенсорі може бути збіднена область МОН ємності, яка виникає під час подачі на фазний електрод збіднюючої напруги рис. 2.5 а, або ж збіднена область зворотно зміщеного фотодіода, рис. 2.5 б. Світлочутливий елемент другого типу краще, хоча б з тієї точки зору, що фотодіодна структура має істотно більш високий коефіцієнт збору світлового потоку через відсутність шарів полікремнію, що поглинає світловий потік. Найпростішою є структура пасивного пікселя, рис. 2.5 [12]. Крім фотодіода вона містить ключовий транзистор VT, який за сигналом RS (Row Select, Вибір стовпчика), підключається до вертикальної шини стовпчика. Таким чином, до цього пікселя підходить дві шини – шина стовпчика і шина, по якій подається сигнал зчитування RS. Особливістю такого типу пікселя є високий коефіцієнт використання площі, так як площа транзистора набагато менше площі фотодіода, і

високий рівень шумів, пов'язаний з тим, що фотодіод підключений безпосередньо до вертикальної шини стовпчика, що має велику ємність.

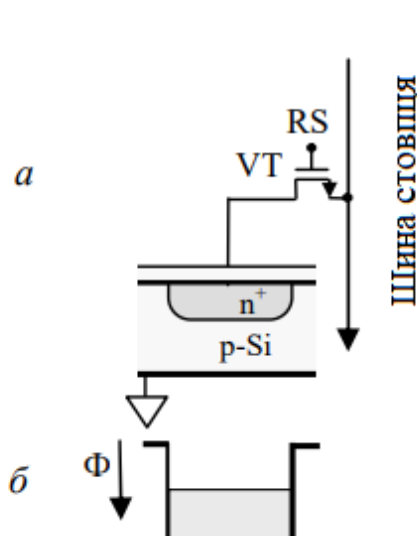


Рис. 2.5. Структура пасивного пікселя а і відповідна діаграма потенціалу б

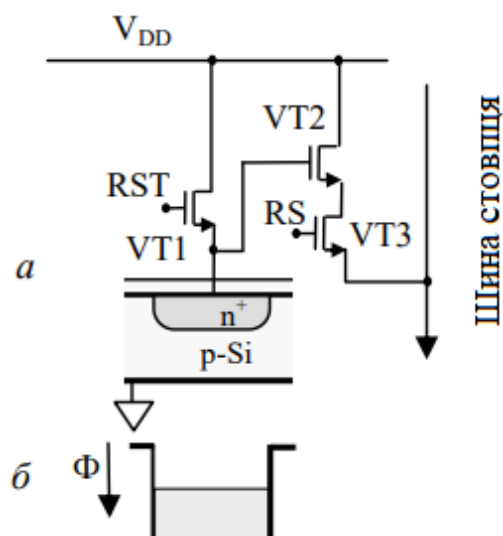


Рис. 2.6. Структура активного пікселя а і відповідна діаграма потенціалу б

Структура активного пікселя містить вже, як мінімум, 3 польових транзистора (рис. 2.6) і чотири шини - вертикальну шину стовпця, шини за якими подаються сигнали RS і RST, а також шину живлення V<sub>DD</sub>. Транзистор VT<sub>3</sub>, керований сигналом RS, виконує ту ж функцію, що і в пасивному пікселі. Транзистор VT<sub>1</sub>, керований сигналом RST (Reset, скидання) служить для скидання накопиченого заряду, а гальванометричний транзистор VT<sub>2</sub> виконує роль стокового повторювача, що здійснює посилення відеосигналу по струмові.

Навантаженням даного транзистора є джерело струму, розташоване в кінці стовпчика за межами фоточутливої секції. Коефіцієнт використання площі у таких пікселів значно нижче за рахунок більшого числа транзисторів, однак шумові характеристики значно краще, ніж в пасивному пікселі. Подальшим розвитком активного пікселя було введення в нього плаваючої дифузійної області, рис. 2.7. В даному виді пікселя накопичений заряд переноситься з фотодіода в плаваючу дифузійну область подачею позитивного зсуву на затвор перенесення TX [13]. Можливість реалізації плаваючої дифузійної області з дуже малою ємністю дозволяє збільшити коефіцієнт перетворення заряду в напругу і розділити процеси накопичення і зчитування по простору. З урахуванням затвора перенесення такий піксель містить чотири транзистора і п'ять шин. У порівнянні з попереднім

пікселем в даному випадку виникає необхідність в шині управління затвором перенесення. Такий піксель має малий коефіцієнт використання корисної площі, проте забезпечує малий рівень флуктуаційних і геометричних шумів.

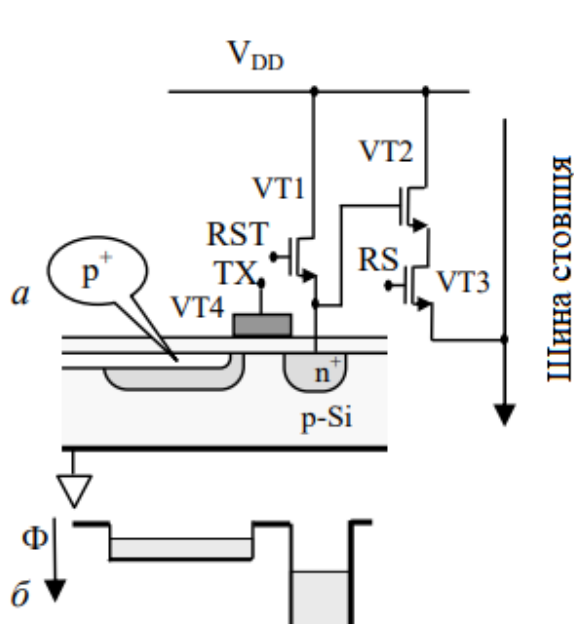


Рис. 2.7. Структура активного пікселя з додатковим затвором *a* і відповідна діаграма потенціалу *б*

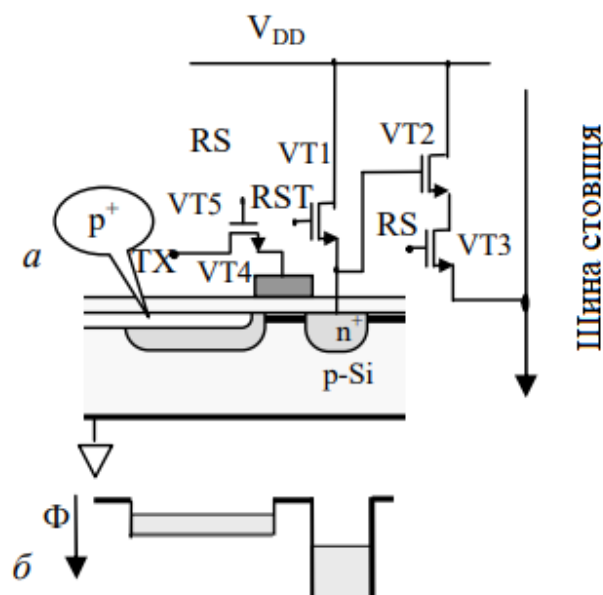


Рис. 2.8. Структура активного пікселя з додатковим затвором *a* і підсилювачем в колі затвору *a* і відповідна діаграма потенціалу *б*

З метою зменшення числа шин управління і збільшення коефіцієнта використання корисної площі сигнали RS і TX можна об'єднати, рис. 2.8. Для структур пікселя з плаваючою дифузійною областю формується відеосигнал, який має трирівневу форму, характерну для фотоприймачів на основі ПЗЗ. Наявність піксельного скидання призводить до появи шуму установки вузла детектування заряду - середньоквадратичне значення флуктації кількості зарядів на вихідній ємності.

Як наслідок, для обробки такого відеосигналу в структуру КМОН сенсора необхідно інтегрувати схему подвійної корелятивної вибірки (ПКВ), так як, вузол, характерний практично для всіх лінійних і матричних ПЗЗ. Особливий інтерес представляють пікселі з логарифмічною характеристикою накопичення, рис. 2.9. При зазначеному на рис. 2.9 включенні польового транзистора співвідношення між струмом і напругою на затворі носить логарифмічний характер. Зазначена властивість дозволяє отримати фотоприймач з розширеним динамічним діапазоном



по світлові і зі світло-сигнальної характеристикою, аналогічною до людської, яка відповідно до закону Вебера-Фехнера має логарифмічний характер.[13]

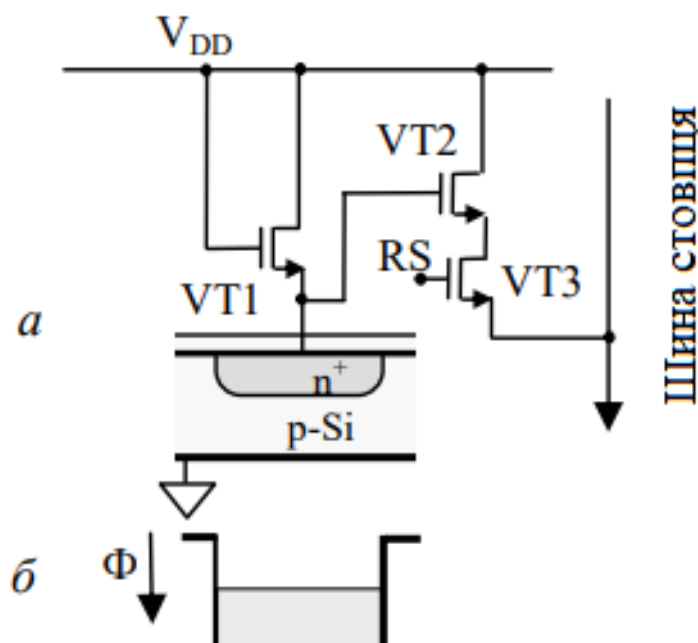


Рис. 2.9. Структура активного пікселя з логарифмічною шкалою *a*, і відповідна діаграма *б*

Важливість принципу накопичення в телебаченні незаперечна, саме з його допомогою здійснюється груповий рахунок фотонів. КМОН телекамери на відміну від фотоприймачів попереднього покоління на ПЗЗ, можуть забезпечити широкий лінійний динамічний діапазон. Технічною основою збільшення динамічного діапазону є ускладнення структури пікселя шляхом введення елементів аналогової або цифрової пам'яті. На рис. 2.10а приведена принципова схема пікселя, що забезпечує лінійний динамічний діапазон по вхідній освітленості 132 дБ - понад мільйон разів [14], а на рис. 2.10б його топологія. Піксель складається з фотодіода VD1, первинної накопичувальної ємності C1, компаратора DA1, додаткових ємностей зберігання C1 і C2 і логіки зчитування.

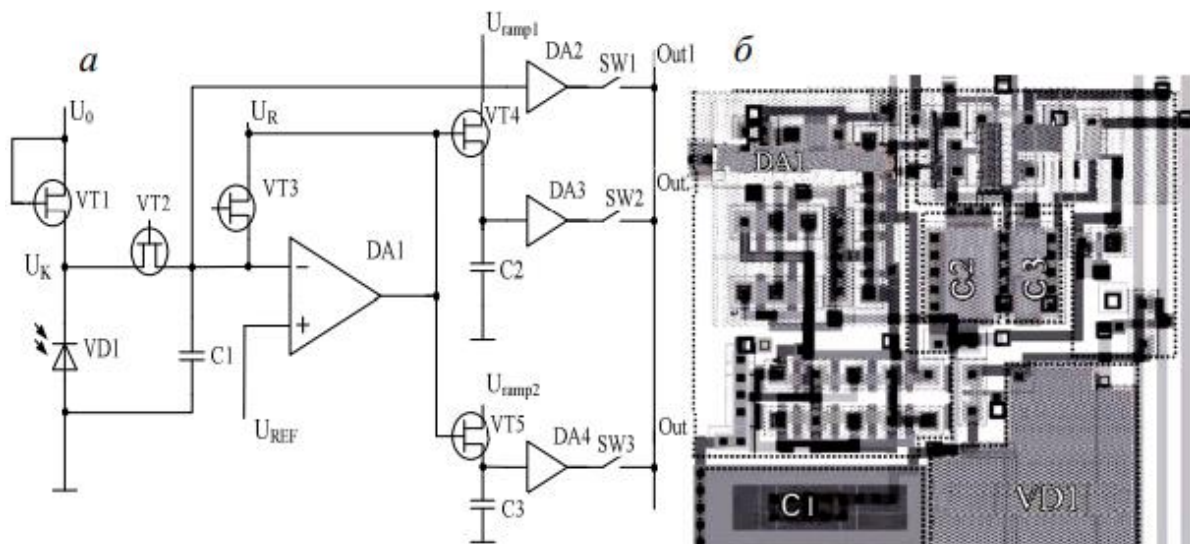


Рис. 2.10. Принципова схема *a* і топологія *б* пікселя з розширеним динамічним діапазоном

### 2.3. Різновидності КМОН ФД матриць

В середині і, особливо, в кінці 90-х років технологія ПЗЗ була завдяки підвищенню точності виготовлення (ультрафіолетова літографія) доведена практично до досконалості. Квантова ефективність кращих фотоприймачів наблизилася до 100%, темнові заряди і власні шуми впали до одиниць електронів на піксель, навіть у відносно недорогих. Однак особливість багаторівневої технології ПЗЗ не дозволяла інтегрувати на той же кристал, що і фотоприймач, інші вузли телевізійної камери, такі як синхрогенератор, відеопроцесор, схеми управління, АЦП. Технологією ПЗЗ володіло обмежене число фірм виробників електронної техніки. До них можна віднести фірми Sony, Sharp, Toshiba, Matsushita (Японія), LG, Samsung (Корея), Philips, Thomson, Texas Instruments, Fairchild, Dalsa, Kodak (Європа і Північна Америка). З іншого боку, в цей же час бурхливо розвивалася технологія виробництва мікросхем статичної та динамічної пам'яті для персональних комп'ютерів на основі технології КМОН технології, які зазвичай мають організацію з довільним координатним доступом. У цьому напрямку працювали багато технологічних гігантів електронної промисловості, такі як Hewlett-Packard, Atmel, Micron (США) [14].

Ступінь інтеграції цих, відносно просто організованих інтегральних схем перевищила мільярд транзисторів на кристалі. Наступним кроком у розвитку КМОП сенсорів була ідея про об'єднання світлочутливої секції, що

представляє собою матрицю фотодіодів і набір зчитуючих шин і керуючих регістрів, аналогічних застосовуваним в мікросхемах пам'яті. Однак ємність шин зчитування залишалася високою, що не дозволяло говорити про високі чутливості і відношенні сигнал / шум. Прорив в цій галузі стався в 1993 році у зв'язку з винаходом Еріком Р. Фоссамом технології активний піксель (APS, Active Pixel Sensor) [13]. Введення підсилювального каскаду в кожен світлочутливий елемент дозволило позбутися від проблем, пов'язаних з ємністю зчитуючих шин і знизити геометричний шум до прийнятних значень. Подальший розвиток КМОН сенсорів було пов'язано зі збільшенням числа транзисторів в пікселі, інтеграції на той же кристал аналогових і цифрових схем управління і обробки відеосигналу, підвищенням чутливості і відносини сигнал / шум, збільшення числа елементів розкладання та інше. Все це стало можливим завдяки тому, що технологія КМОН дозволяє досить просто розміщувати на тому ж кристалі, що і фотоприймач, такі складні вузли, як АЦП. Розвиток КМОП сенсорів за останні 15 років характеризується кількома етапами, які визначаються зміною їх структури [13].

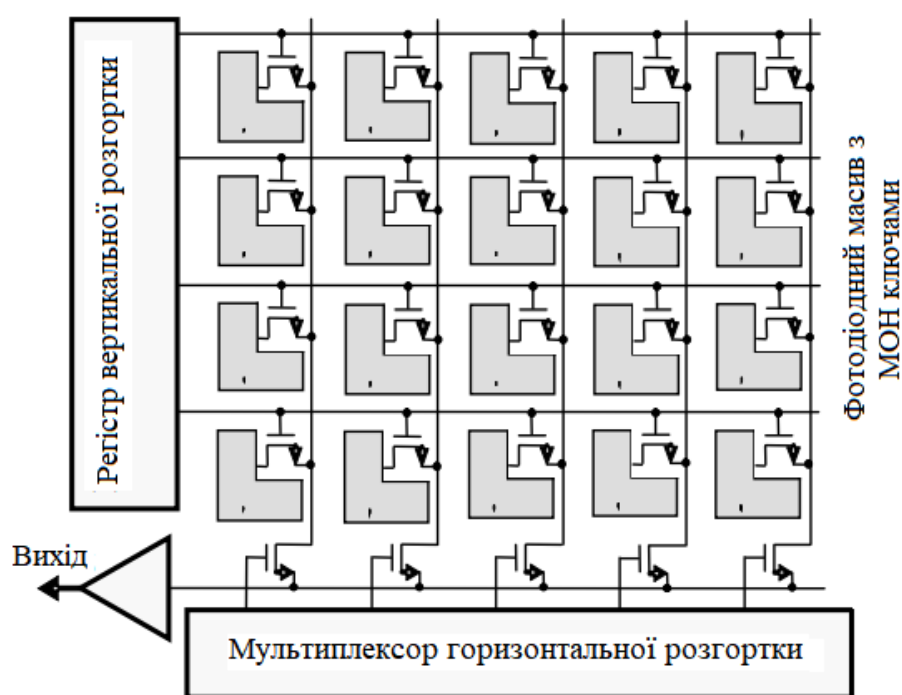


Рис. 2.11. КМОН сенсор з пасивним пікселем

Перше покоління КМОН сенсорів носить назву сенсор з пасивним пікселем (Passive Pixel Sensor, PPS). Їх особливістю є найбільший зв'язок із мікросхемами динамічної або статичної пам'яті. Даний вид сенсора, крім матриці фотодіодів

містить: регістр, який здійснює вибір рядка; ключові польові транзистори, які здійснюють комутацію фотодіодів вибраного рядка до вертикальних шин стовбців; аналоговий мультиплексор, який здійснює підключення відеосигналу з обраного фотодіода до вихідного підсилювача (рис. 2.11).

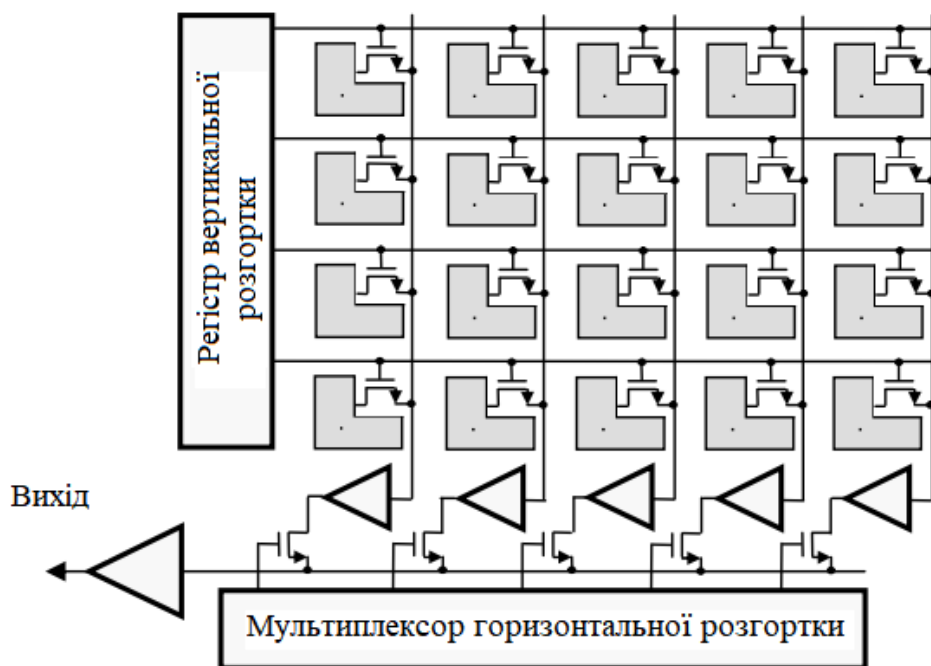


Рис. 2.12. КМОН сенсор з пасивним пікселем і активним стовпцем

Висока ємність вертикального шини стовбця, підсумовується з ємністю горизонтальної шини, не дозволяє отримати прийнятний рівень відеосигналу при обмеженому обсязі зарядового пакета і, як наслідок, даний вид сенсора забезпечує низьке відношення сигнал / шум. Для зниження впливу ємностей в сенсор з пасивним пікселем були введені підсилювачі відеосигналу на кожен стовпець (рис. 2.12).

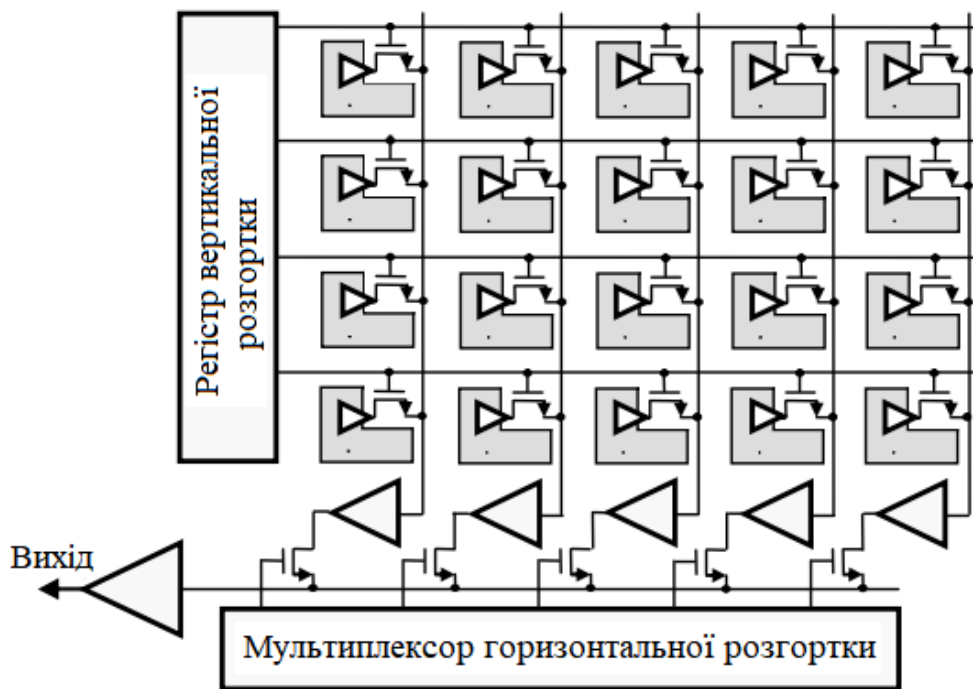


Рис. 2.13. КМОН сенсор з активним пікселем і активним стовпцем

Таке рішення дозволило усунути вплив на амплітуду відеосигналу ємності горизонтальної шини. Вплив ємності вертикальної шини на відеосигнал було подолано в КМОН сенсор з активним пікселем (Active Pixel Sensor, APS, рис. 2.13).

Революційність цієї технології пов'язана з тим, що підсилювач (в найпростішому випадку транзисторний стоковий повторювач) розміщується безпосередньо в кожному пікселі фотоприймача. Тим самим ємність зчитування і ємність вертикальної шини стовбця виявляються розділеними цим підсилювачем. При цьому ємність зчитування може мати той же порядок, що і в ПЗЗ - одиниці фемтофарад [фФ]. З урахуванням підсилювача коефіцієнт перетворення заряду в напругу виявляється не нижче, а навіть вище, ніж в фотоприймача на ПЗЗ. В сучасних матричних ПЗЗ ємність плаваючою дифузійної області, в якій здійснюється зчитування заряду, становить величину порядку 0,01 пФ, що відповідає коефіцієнту перетворення в 15 ... 25 мкВ / е.[15] У КМОН фотоприймачі ємність зчитування зазвичай того ж порядку, однак застосування активного підсилювача дозволяє домогтися еквівалентного коефіцієнта перетворення на порядок більшого, ніж у ПЗЗ - до 250 мкВ / е, що позитивно позначається на шумових характеристиках фотоприймача. Це в корені вирішує проблему чутливості і відношення сигнал / шум.

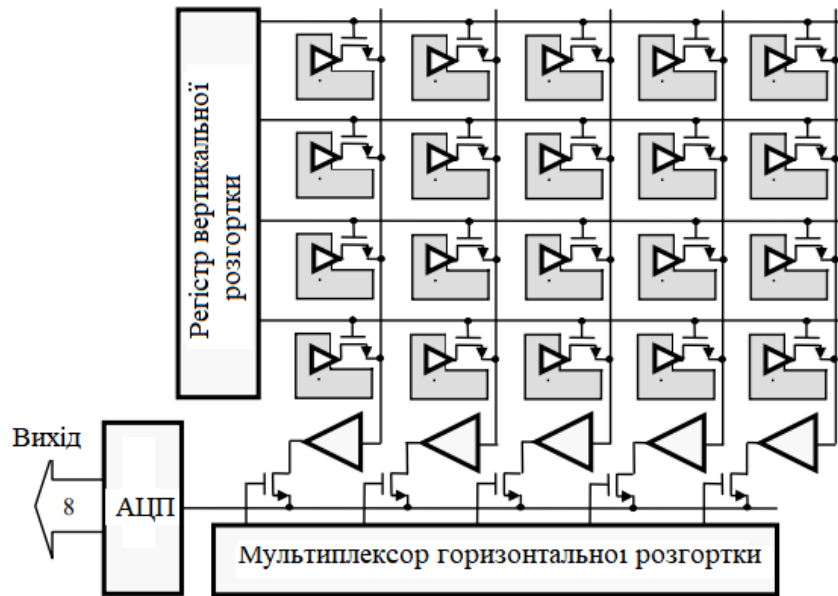


Рис. 2.14. КМОН сенсор з активним пікселем, активним стовпцем і одним АЦП

Розвиток технології активних пікселів надалі йшло по шляху поліпшення якісних характеристик фотодіодів і транзисторів, а також по шляху збільшення транзисторів в кожному пікселі. Інший важливий напрям розвитку КМОН сенсорів було пов'язано з тим, що як вже говорилося вище, КМОН технологія дозволяє інтегрувати різні вузли телевізійної камери на той же кристал і дає розробнику можливість використання дуже великої кількості польових транзисторів для реалізації тих чи інших вузлів. Наступним кроком на цьому шляху була реалізація аналого-цифрового перетворювача на тому ж кристалі, рис. 2.14.

Однією з особливостей КМОН сенсорів є можливість реалізації високої частоти опитування, що перевищує частоту зчитування зарядових пакетів з ПЗЗ. У зв'язку з цим вимоги по швидкодії до АЦП, встановленому в КМОП сенсор, виявляються досить жорсткими.

Висока частота зчитування призводить до широкої смуги частот відеосигналу і гіршим шумовим характеристикам, а велика частота перетворення АЦП - до великого виділення потужності. Для подолання цього недоліку в КМОН сенсорах АЦП стали розташовувати з розрахунку один АЦП на кожен стовпець і комутацію здійснювати в цифровому вигляді (рис. 2.15).

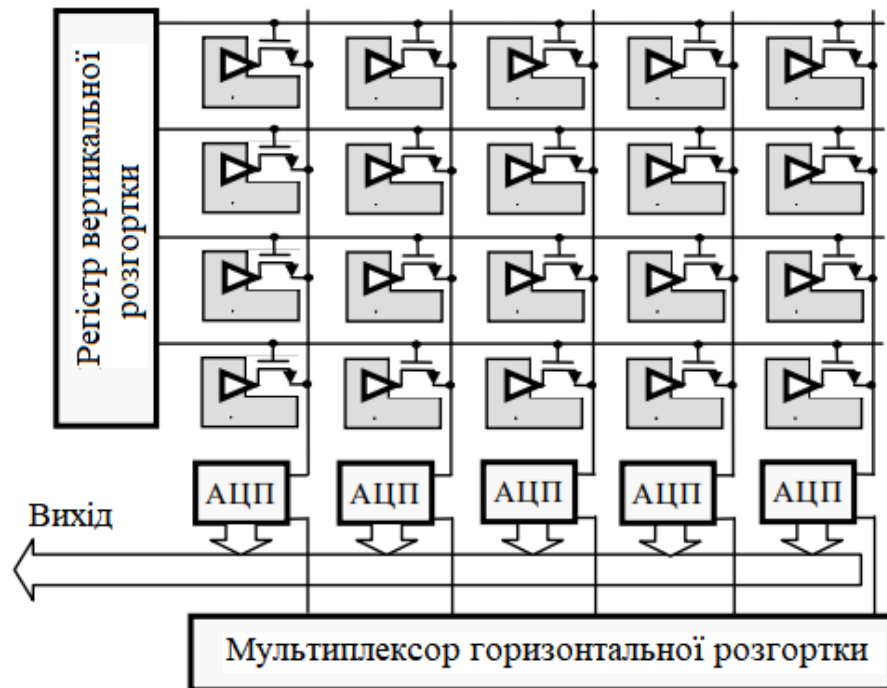


Рис. 2.15. КМОН сенсор з активним пікселем і АЦП на кожен стовпець

Це дозволило знизити частоту перетворення кожного з АЦП в число раз, яке рівне кількості стовпців в фоточутливій секції, а також у відповідне число разів зменшити смугу частот відеосигналу. Подальший розвиток пішов по шляху руху до КМОН сенсора з цифровим пікселем (Digital Pixel Sensor, DPS), рис. 2.16 [15].

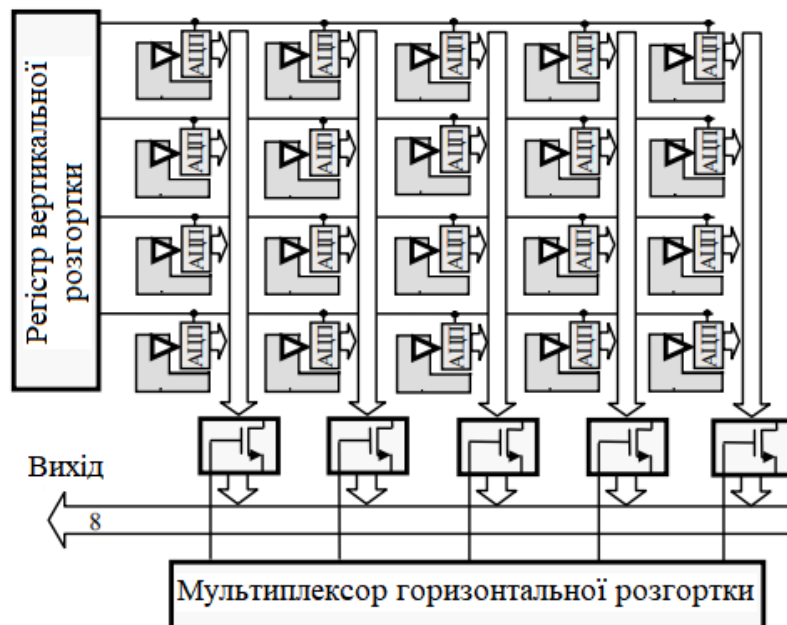


Рис. 2.16. КМОН сенсор з активним цифровим пікселем

Особливістю цих перетворювачів є інтеграція в кожен піксель не тільки

активного підсилювача, але і безпосередньо АЦП. При цьому частота перетворення АЦП стає рівною кадрової частоті фотоприймача, а смуга частот відеосигналу зменшується до мінімальних значень. В даний час відомі КМОН сенсори з цифровим пікселем розміром  $9,8 \times 9,8$  мкм (при точності виготовлення 0,18 мкм), які містять в кожному пікселі АЦП, що складається з 37 транзисторів.

## ВИСНОВКИ

В главі були розглянуті такі різновидності КМОН сенсорів: з пасивним пікселем; з пасивним пікселем і активним стовпцем; з активним пікселем і активним стовпцем; активним пікселем, активним стовпцем та одним АЦП; активний піксель і АЦП на кожен стовпець та активний цифровий піксель. КМОН сенсор з активним цифровим пікселем об'єднує усі переваги попередніх різновидів та виключає усі недоліки. На даний час це один із найкращих і найрозповсюдженіший сенсор.

Підсумовуючи КМОН-ФД матриці на відміну від фотоприймачів попереднього покоління на ПЗЗ, можуть забезпечити широкий лінійний динамічний діапазон, можливість реалізація високої частоти опитування зарядових пакетів. Технічною основою збільшення динамічного діапазону є ускладнення структури пікселя шляхом введення елементів аналогової або цифрової пам'яті.

## ГЛАВА 3. ДАТЧИКИ ЗОБРАЖЕННЯ НА КМОН МАТРИЦЯХ

### 3.1. Кольорове зображення на КМОН-датчиках

КМОН – датчики детально описанні в огляді науково-технічної літератури по функціонуванню пристроїв на КМОН – матрицях. В даній главі більш детально розглянемо утворення кольорового зображення та параметрах КМОН пристроїв.

Сенсори - це пристрої, що визначають лише градації сірого (градації інтенсивності світла - від повністю білого до повністю чорного). Щоб камера могла розрізняти кольори, на кремній за допомогою процесу фотолітографії накладається масив кольорових фільтрів. У тих сенсорах, де використовуються мікролінзи, фільтри поміщаються між лінзами і фотоприймачем. Для пристроїв з одним сенсором, якими є більшість споживчих цифрових фотоапаратів, для обробки різних кольорів використовуються масиви кольорових фільтрів

|      |      |          |        |      |      |
|------|------|----------|--------|------|------|
|      |      |          |        |      | Арк. |
|      |      |          |        |      | 40   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |      |



(англ. *color filter arrays, CFA*) [14].

Виділимо основні три методи отримання кольорових цифрових зображень, що використовуються в цифрових відеокамерах, які ґрунтуються:

- на використанні мозаїчного фільтра, складеного з кольорових фільтрів, кожний з яких накриває фотодіод пікселя;
- формуванні трьох шарів пікселів, кожний з яких розміщують на такій глибині у кремнієвій пластині, де найбільше поглинається червоне, зелене або синє світло (інакше кажучи, поглинається світло з певною довжиною хвилі) ;
- використання повнокольорової RGB-матриці, де поділ на адитивні кольори RGB здійснюється дихроїчними дзеркалами всередині кожного пікселя, що містить три фотодіода і одну мікролізу на весь піксель.

Для кожного застосування розробляються свої масиви кольорових фільтрів. Але в більшості сенсорів цифрових камер найбільш популярними є масиви фільтрів колірної моделі Баєра (англ. *Bayer pattern*). Ця технологія була винайдена в 70-х компанією Kodak. Це RGB-модель кольору, в якій кольорове зображення (за RGB-базисом) розкладають на червону, зелену та синю компоненти (англ. *red-green-blue*) (рис. 3.1.). У цій системі фільтри розташовані упереміж, в шаховому порядку, а кількість зелених фільтрів у два рази більше, ніж червоних або синіх. Порядок розташування такий, що червоні і сині фільтри розташовані між зеленими.

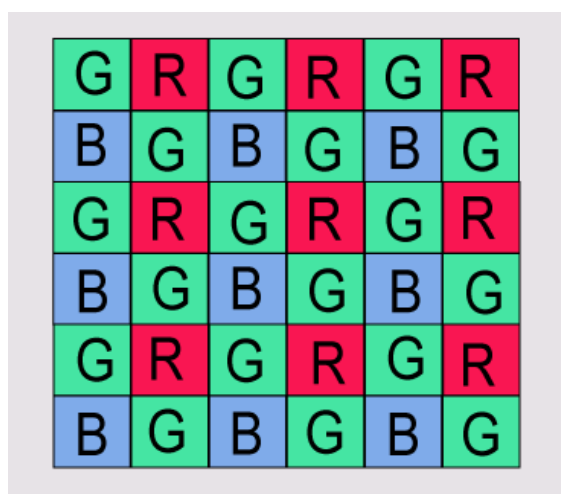


Рис. 3.1. Розміщення світлофільтрів в Баєрівській схемі

Таке кількісне співвідношення пояснюється будовою людського ока - він більш чутливий до зеленого світла. А шаховий порядок забезпечує однакові за

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 41   |

кольором зображення незалежно від того, як ви тримаєте камеру (вертикально або горизонтально). При читанні інформації з такого сенсора, кольору записуються послідовно в рядках. Перший рядок повинна бути BGBGBG, наступна - GRGRGR і т.д.

Варіацією фільтра Баєра є RGBE-фільтр від компанії Sony. Тобто до RGB-світлофільтра доданий смарагдовий (англ. *emerald*). Теоретично, четвертий компонент для визначення кольору вже зайвий. Проте на практиці він трохи наближає колірну гамму зображення до натуральної (для людського ока), покращуючи передачу синьо-зелених і червоних відтінків.

У RGBW- моделі його замінюють на білий колір (англ. *white*). В CYGM-моделі використовують блакитний, жовтий, зелений та пурпурний кольори (англ. *cyan-yellow-green-magenta*), у CYM-моделі наявні тільки блакитний, жовтий та пурпурний кольори (рис.3.2.). Типова проблема сенсорів з такою мозаїкою - це погана реєстрація світла в синьому та червоному діапазонах довжин хвиль.

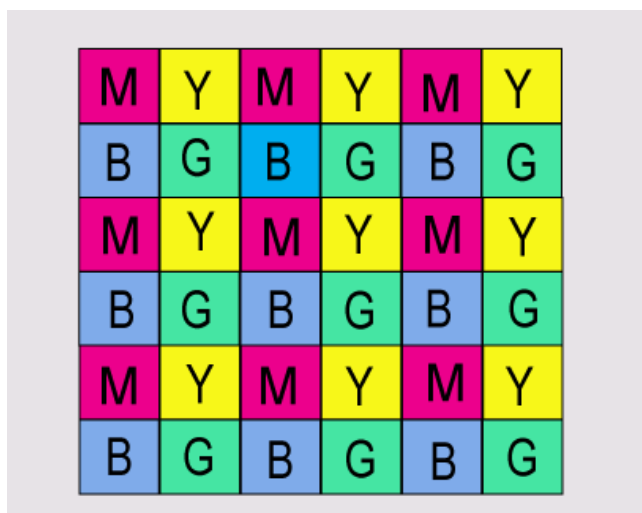


Рис. 3.2. CYGM-модель розміщення світлофільтрів

Кольори поділяють на адитивні та субтрактивні.

При адитивному синтезі основними кольорами є кольори випромінювань. Під час змішування у певних пропорціях червоного, зеленого та синього світла можна отримати світло будь-якого кольору. Зокрема, при триколірних синтезі використовуються синій, зелений і червоний кольори. Ці кольори лінійно незалежні, тобто жоден з них не може бути отриманий з двох інших шляхом оптичного змішання випромінювань. За допомогою даного змішання синтезуються всі інші кольори, які відрізняють по колірному тону, насиченості і яскравості.

Аддитивний синтез кольору ґрунтується на метамерії – властивості людського ока сприймати світло з різним спектральним складом як світло одного кольору.

Субтрактивний синтез пов'язаний з процесами поглинання і відображення білого світла, і тому він використовує кольори барвників. Якщо червоний, зелений та синій кольори вважати основними, тоді, при триколірному субтрактивному синтезі додатковими кольорами є жовтий, пурпурний і ціановий (зелено-блакитний), а для його позначення використовується аббревіатура CMY. У субтрактивному синтезі основний колір вважається додатковим до основного кольору адитивного синтезу, якщо барвник першого повністю поглинає випромінювання другого. Наприклад, до червоного кольору додатковим буде ціановий, до синього - жовтий, а до зеленого - пурпурний.[14]

Названі моделі кольору використовують в матричних (мозаїчних) кольорових фільтрах – відповідно у RGGB-фільтрі (фільтрі Баєра), а також у RGBW-, RGBE-, CYGM- та CYUM-фільтрах. Такі назви фільтрів означають, що просторовий період (елемент матриці) утворено чотирма фільтрами, два з яких можуть бути однаковими. Зауважмо, що, окрім 2 x 2-елементів, є й 2x4-елементи, а також 4x4-елементи - це RGBW-фільтри, в який половина кольорових фільтрів є білими (повністю прозорими).

Фільтр наносять прямо на поверхню матриці. Матеріалом фільтра є фоторезист, в якому міститься органічний барвник чи неорганічний пігмент, причому барвник розчинений у фоторезисті, а пігмент утворює з ним суспензію. У мозаїчних фільтрах частіше використовують пігменти як більш стійки до нагрівання та фотохімічної дії світла. Товщина фільтрів може не перевищувати 1 мкм.

Початковий колір пікселя у цифровому зображенні відновлює процесор камери, який інтерполяцією сигналів з дев'яти і більше сусідніх фотодіодів розраховує колір кожного пікселя кольорового цифрового зображення. Як результат утворюється цифрове зображення у *JPEG*- і або *TIFF*-форматі організації та збереження файлу цифрового зображення, в яких відбувається стиснення інформації з деякою її втратою.

*JPEG* (англ. *Joint Photographie Experts Group*- Об'єднана група експертів з фотографії) – формат стиснення, який не призводить до відчутного зниження якості

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 43   |

зображення (використовують у цифрових камерах та в процесі збереження і передавання зображень в Інтернеті) [14].

*TIFF* – формат (англ. *tagged image file format* - формат файла зображення з тегами) може бути як зі стисненням, так і без нього. Теги – це вказівники для програми, яка обробляє зображення, а також додаткова службова інформація:

- про кількість рядків і стовпців у зображенні;
- застосований вид стиснення (компресії) даних;
- використану модель кольору - *RGB, RGBE чи CYGM*;
- тип комп'ютера й операційну систему, за допомогою якої отримано зображення;
- дату і час запису зображення тощо.

Іншим способом отримання кольорового зображення є використання матриць Foveon X3. В основу покладена ідея поглинання фотонів різних довжин хвиль на різних глибинах у напівпровіднику (рис. 3.3). Це дає можливість для кожного пікселя сенсора отримувати свої власні RGB- компоненти, в одному пікселі поєднані детектори усіх трьох колірних компонент. Дуже витончена ідея: вмість позбавляє від колірної інтерполяції, згладжування і різниці фаз між RGB- компонентами. Використовуючи спектральні властивості кремнію, а саме його різної поглинальної здатності для червоного, зеленого та синього світла. Синє світло має найменшу проникну здатність і поглинається у тонкому (~0,5 мкм) приповерхневому шарі кремнію, зелене світло проникає глибше (~1,5 мкм), а червоне проникає на найбільшу глибину (~ 4,5 мкм), де, відповідно, і відбувається генерація «синіх», «зелених» та «червоних» електронно-діркових пар (рис.3.4). У процесі створення датчика використано стандартну КМОН-технологію мікроелектроніки.

Таке розшарування нерівноважних носіїв заряду дає змогу сформувати у кожному шарі кремнію фотодіод, чутливий фактично тільки до світла, яке найбільше поглинається у певному шарі.

*Прямий датчик зображення* — це датчик, в якому відбувається пряме (без використання кольорових фільтрів) перетворення кожного елемента кольорового зображення у фотоелектричні сигнали червоного, зеленого та синього пікселів.

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 44   |

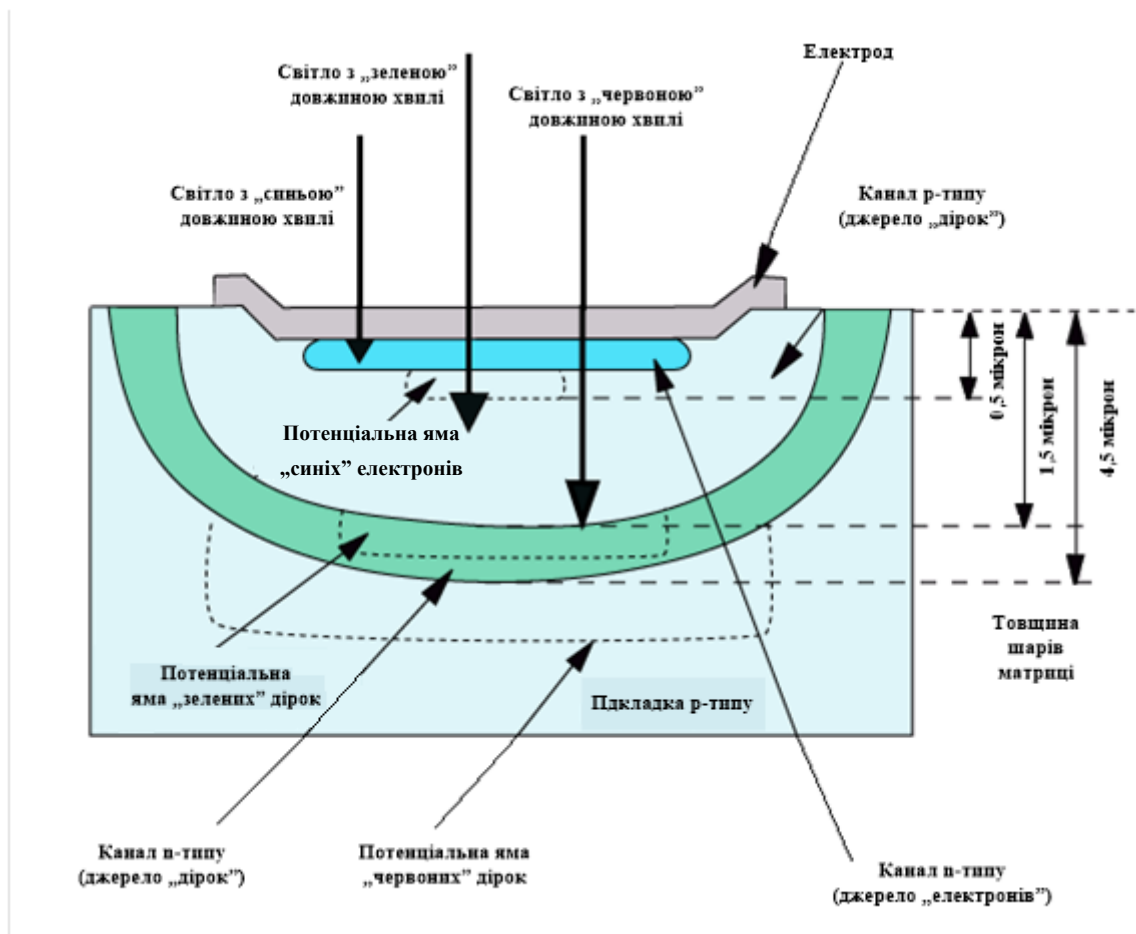


Рис. 3.3. Структурна схема матриці Foveon X3

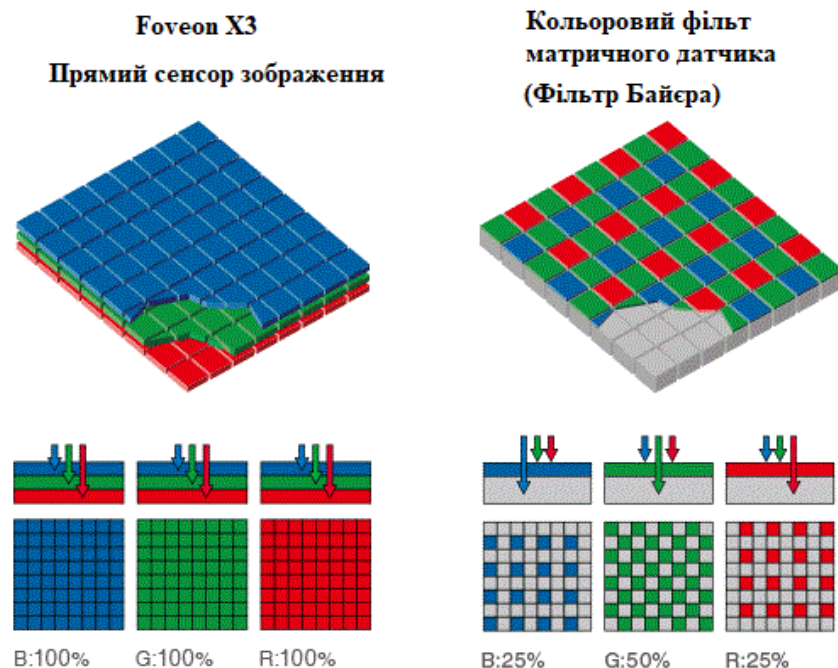


Рис. 3.4. Порівняння двох методів отримання кольорових цифрових зображень, при використанні мозаїчного фільтра та формуванні трьох шарів пікселів

Виділимо декілька переваг прямого датчика зображення над фільтром Баєра:

- адекватне перетворення всіх точок (елементів) кольорового зображення у фотоелектричні сигнали відповідних пікселів;
- не потрібна програма, яка визначає колір пікселя інтерполяцією кольорів сусідніх пікселів;
- не потрібний згладжувальний (розмиваючий) фільтр, який знижує різкість та роздільну здатність цифрового зображення;
- більша (приблизно у три рази) роздільна здатність за рахунок розміщення фотодіодів «етажеркою»;
- менший час готовності камери після зйомки;
- простіша технологія, оскільки немає потреби у виготовленні на поверхні матриці мозаїчного фільтра;
- можливість об'єднання сигналів із сусідніх пікселів для створення «суперпікселя» розміром, наприклад, 2x2 або 4x4, щоб зберегти відношення сигнал/шум на виході камери у разі зниження освітленості сцени під час фотозйомки або у разі збільшення частоти кадрів під час відео зйомки [14].

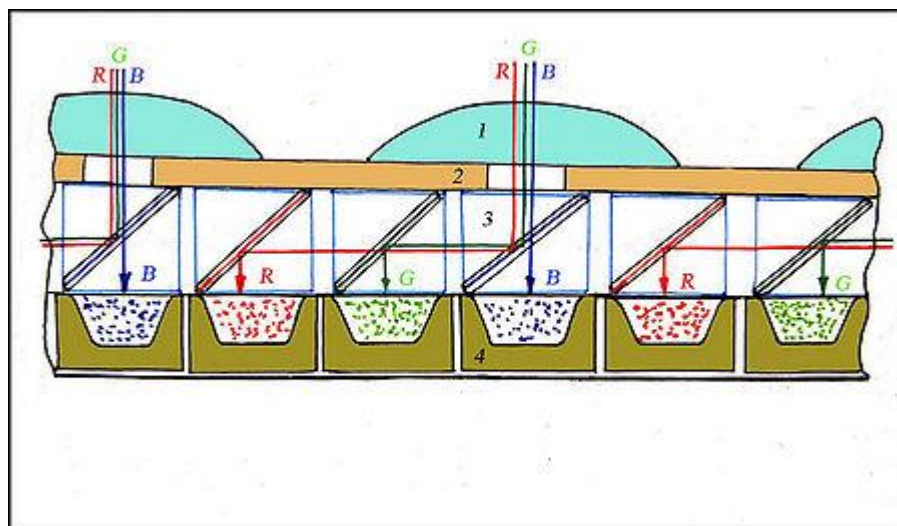


Рис. 3.5. Схема роботи повноколірної RGB матриці.

Світло RGB проходить через відкриту мікролінзу 1 і падає на перше дихроїчне дзеркало 3. При цьому перша синя складова B відбивається першим дихроїчним дзеркалом (дихроїчна призма) на "синій" фотодіод. Далі друга дихроїчна призма віддзеркалює зелену складову G на "зелений" фотодіод. Наступна червона R і інфрачервона (ІЧ складає) складові потрапляють на

дихроїчне дзеркало, яке відображає червону R складову на фотодіод. Інфрачервона складова поглинається.

У порівнянні з матрицями фотосенсорів, крім систем без фільтрів Байєра з використанням тришарових фотодіодів (Foveon X3-сенсор) або трьохматричних фотодатчиків (3ПЗЗ-сенсор), дана технологія має перевагу в ефективності використання світлового потоку, 1.5-кратне порівняно з елементами фотосенсорів RGBW- сенсори матрицями RGBW і триразове - в порівнянні з RGBG матрицями. Також, одним з важливих переваг є те, що при поділі променю світла RGB на його компоненти забезпечується отримання кольорового зображення предметної точки в чистому вигляді, тобто без використання додаткових заміщених складових кольорів (одержуваних при використанні фільтрів Байєра). Це дає підвищення якості кольорового зображення кожної його одиниці. Не менш важливим є розміщення пікселів в одній площині, що дозволяє отримувати фотодатчики по типу ПЗЗ або КМОН (малогабаратних) і вбудовувати їх в цифрові фотокамери.

### 3.2. Параметри та характеристики датчиків зображення

**Абсолютний показник якості.** Датчик зображення призначений для отримання, перетворення та передавання інформації від об'єктів навколишнього світу до інтелектуальної системи, де ця інформація обробляється та інтерпретується. Очевидно, що на результат інтерпретації і можливу реакцію впливає кількість переданої інформації. Дискретність носіїв інформації (фотонів та електронів) спричиняє часткову втрату інформації. Альберт Роуз запропонував ввести абсолютний показник якості зорової системи (зорової у широкому розумінні цього слова - і зорової системи людини або тварини, і електронної зорової системи).

**Спектральний діапазон.** Більшість сенсорів створені на основі кремнію, які призначено для роботи з видимим випромінюванням.. Коли фотони вдаряються об кремній, електрони в кремнії збуджуються і ковалентний зв'язок, що утримує електрони в атомах кремнію, порушується. Кількість вивільнених електронів прямо пропорційно енергії або інтенсивності світла.

Зауважимо, фотони повинні володіти достатньою енергією, щоб зруйнувати ковалентні зв'язки в атомах кремнію, щоб з'явилися вільні електрони (або електронно-діркові пари). Тобто енергія фотонів повинна бути більше, ніж ширина

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 47   |

забороненої зони кремнію - 1,1 еВ. Це означає, що хвилі повинні бути з видимої частини спектра (400-750 нм) або близькі до інфрачервоного (до 1100 нм) - тільки фотони цих хвиль здатні зруйнувати зв'язки. Саме тому в якості основи сенсорів для фотоапаратів був обраний кремній. Хвилями довжиною менше 400 нм можуть бути поглинені структурою сенсора. Якщо фотони не володіють необхідною енергією (довжина таких хвиль зазвичай більше 1100 нм), то вільних електронів не виникає і фотони не викликають жодної реакції.[14]

Таблиця №3.1

Деякі параметри КМОН матриць

| Наименование сенсора | Кол-во элементов | Тип, размер | Эффективные элементы (НхV) | Частота кадров, Гц | Размер элемента, мкм |
|----------------------|------------------|-------------|----------------------------|--------------------|----------------------|
| <b>Sony</b>          |                  |             |                            |                    |                      |
| IMX006               | 1,33М            | 1/3,2       | 1296х985                   | 15                 | 3,45х3,45            |
| IMX011               | 2,13М            | 1/3         | 1656х1249                  | 15                 | 2,925х2,925          |
| <b>Sharp</b>         |                  |             |                            |                    |                      |
| PJ24P3BA0ET          | 3,27М            | 1/3,2       | 2096х1560                  | 3                  | 2,2х2,2              |
| <b>Panasonic</b>     |                  |             |                            |                    |                      |
| MN39960              | 7,38М            | 4/3         | 3136х2352                  | 3                  | 5,6х5,6              |
| <b>Samsung</b>       |                  |             |                            |                    |                      |
| S5K4AAF              | 1,31М            | 1/4         | 1280х1024                  |                    | 2,8х2,8              |
| <b>Micron</b>        |                  |             |                            |                    |                      |
| MT9M112              | 1,31М            | 1/4         | 1280х1024                  | 15                 | 2,8х2,8              |
| <b>Philips</b>       |                  |             |                            |                    |                      |
| FXA1012              | 2,09М            | 2/3         | 1616х1296                  | 5                  | 5,1х5,1              |
| <b>Canon</b>         |                  |             |                            |                    |                      |
| EOS 10(704F)         | 6,29М            | 22,7х15,1   | 3072х2048                  | 3                  | 7,4х7,4              |
| EOS 350D             | 8,00М            | 22,2х14,8   | 3456х2304                  | 3                  | 6,4х6,4              |
| <b>Kodak</b>         |                  |             |                            |                    |                      |
| KAS-3100             | 3,15М            | 1/2,7       | 2048х1536                  | 12                 | 2,7х2,7              |
| KAS-5000             | 5,04М            | 1/1,8       | 2592х1944                  | 6                  | 2,7х2,7              |

При використанні ПЗЗ в фотометрії особливо популярний діапазон 400 — 1050 нм. Спектральна чутливість зростає в частині спектру, де хвилі мають велику довжину (800-900 нм), проте помітно падає в короткохвильовій частині (біля 400 нм)(табл.3.1).



Кремній, який використовують у фоточутливих елементах подібних матриць, здатний реєструвати і ближнє інфрачервоне випромінювання (з довжинами хвиль до 1100 нм).

ПЗЗ-матриці, окрім кремнію, виготовляють також з антимоніду індію InSb та телуриду кадмію-ртут  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ . Матриці з InSb перекривають діапазон  $\lambda = 2-5,5$  мкм, а матриці з  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  - декілька діапазонів залежно від відносного вмісту кадмію у певній сполуці - 1 0-2 5, 3-5 та 8-12 мкм.

**Квантова ефективність.** *Квантова ефективність* цифрової камери - це відношення кількості електронів інформаційних зарядів, накопичених у всіх потенціальних ямах матриці за проміжок часу  $\Delta t$ , до кількості фотонів, перехоплених фотооб'єктивом за той самий проміжок часу. Зниження квантової ефективності може бути зумовлене оптичними та електричними втратами.[14]

Частина світла, яке потрапляє у фотооб'єктив, втрачається внаслідок відбиття від поверхонь лінз та поглинання в них. Втрати світла у фотооб'єктиві характеризують коефіцієнтом пропускання фотооб'єктива, який можна розрахувати за формулою:

$$T_{ob} = (1 - R_c)^m \exp(-\alpha l_\Sigma)$$

де  $R_c$ - коефіцієнт відбиття просвітлювального покриття поверхні лінзи;  $m$  - кількість таких поверхонь;  $\alpha$  - коефіцієнт поглинання оптичного скла;  $l_\Sigma$  - сумарна товщина лінз.

Також квантову ефективність зменшує невидиме випромінювання, яке не формує цифрового зображення, але здатне утворити паразитний заряд у потенціальній ямі (фонове засвічування). Ультрафіолетове випромінювання майже все поглинається склом фотооб'єктива (скло, яке використовується в лінзах об'єктива, яке не пропускає ультрафіолетове випромінювання), а от інфрачервоне випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda < 2,4$  мкм проходить крізь фотооб'єктив, тому перед матрицею встановлюють світлофільтр, який його не пропускає.

Світло втрачається також у самій матриці внаслідок відбиття від її просвітлювального покриття, потрапляння світла у проміжки між фоточутливими елементами, а також у разі недостатньої або надмірної глибини поглинання фотонів, коли генеровані ними фотоелектрони не здатні потрапити у потенціальну

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 49   |

яму. Прикладом підвищення квантової ефективності, це використання циліндричних мікролінз.

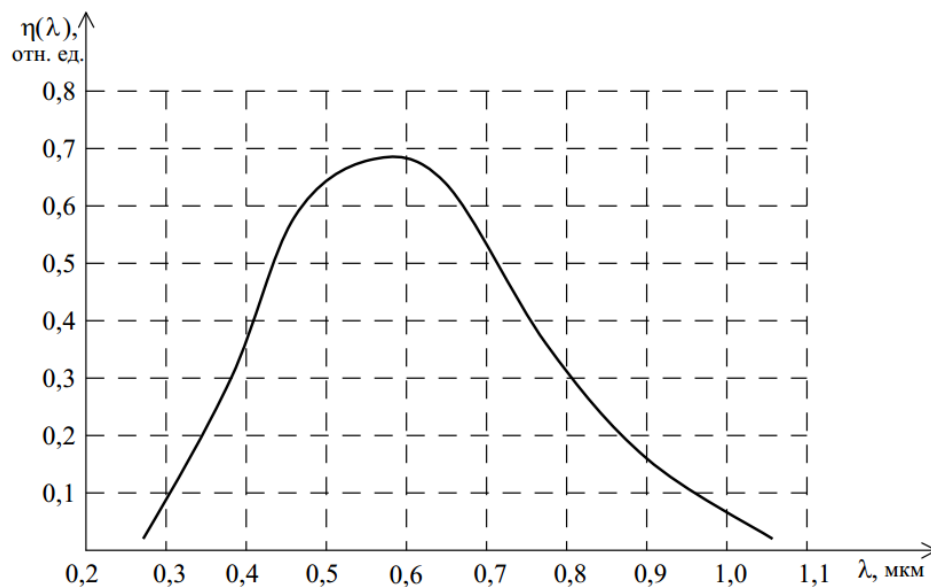


Рис. 3.7. Спектральна щільність квантової ефективності типової КМОН-матриці

Електричні втрати пов'язані з перенесенням інформаційного заряду з однієї потенціальної ями в іншу.

Типову спектральну характеристику квантової ефективності представлено на (рис.3.7), де:  $\eta(\lambda)$  - квантова ефективність, що представляє собою відношення середнього числа фотоелектронів  $n_\phi$ , обумовлених поглинанням середнього числа фотонів  $N_\phi$ , до числа цих фотонів:

$$\eta = \frac{\bar{n}_\phi}{N_\phi} * 100\%$$

**Просторова роздільна здатність.** Роздільна здатність фотоприймальної матриці визначається кількістю пікселів, які може утворити у цифровому зображенні певна матриця. Роздільна здатність вимірюється в мегапікселях (Мп). Роздільна здатність матриці не залежить від щільності розміщення фоточутливих елементів на поверхні напівпровідникової підкладки. Таким чином, роздільну здатність матричного фотоприймача можна підвищити, збільшуючи кількість фоточутливих елементів як за рахунок збільшення площі матриці, так і за рахунок зменшення розмірів елементів. Роздільна здатність професійних цифрових фотоапаратів із матрицями такого розміру сягає 50 Мп. У цифрових камерах наукового призначення, наприклад астрономічних, площа матриці перевищує 10 см<sup>2</sup>, що дозволяє отримати роздільну здатність понад 100 Мп [17].

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 50   |

Технологія виготовлення КМОП мікросхем є найбільш досконалою інтегральною технологією. Розміри елементів на кристалі в даний час значно менше одного мікрметра, а кількість елементів на кристалі становить кілька мільярдів. Однак, фоточутливий елемент принципово не може бути дуже маленьким. Обмеження пов'язані з довжиною хвилі випромінювання, що приймається. Так, лінійний розмір фоточутливих елементів більшості КМОП-фотоприймачів становить  $3 \div 10$  мкм, а теоретичним межею в даний час вважається розмір 1,5 мкм. Розрізняють повну роздільну здатність (загальну кількість пікселів у матриці, наприклад, якщо воно становить 1,5 мільйона, говорять про 1,5-мегапіксельну камеру) та ефективну роздільну здатність (кількість пікселів, яку приймає фотографічне зображення, вказується кількість стовпців і рядків ПЗЗ-матриці, що бере участь у формуванні зображення). Різниця між цими двома показниками не перевищує 5%. Частина периферійних пікселів матриці захищена від світла і використовується для компенсації у фото- і електричному сигналі темного струму, а частина, це так звані, «темні» або дефектні пікселі.

**Глибина кольору** - це енергетична роздільна здатність, яка визначає, скільки відтінків певного кольору у вихідному зображенні й відповідно скільки рівнів яскравості предмета певного кольору може передати цифрова камера. Рентгенівські камери передають величини прозорості предмета у вигляді відтінків сірого кольору в чорно-білому зображенні.

При великій розрядності АЦП можна (теоретично) досягти більшої глибини кольору (англ. *color depth*). Із глибиною кольору тісно пов'язана така величина, як глибина пікселя, її вимірюють у бітах на піксель, показуючи, скільки бітів використовують для кодування кольору одного пікселя зображення (що більше біт інформації на піксель, то більше доступно кольорів і точнішим є їх представлення). У RGB-моделі кольору комп'ютерної графіки використовують 24-бітні кольори, тобто червоний, зелений та синій кольори мають кожний по 256 ( $2^{24}$ ) відтінків, уможливорюючи відображення понад 16 млн (точніше  $256^3$ ) кольорів.[14]

Цифрові камери, які працюють із невидимим випромінюванням, зазвичай мають енергетичну роздільну здатність (глибину піксели) 16 біт, гобто забезпечують передавання 65 536 ( $2^{16}$ ) відтінків сірого кольору.

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 51   |

**Динамічний діапазон.** Від матриці потрібна здатність реєструвати світло як при яскравому сонці, так і при слабкому кімнатному освітленні. Тому потенційні ями матриці повинні бути досить ємнісними, а також вміти як утримувати мінімальну кількість електронів при слабкій освітленості, так і вміщати великий заряд, що отримується при попаданні на сенсор потужного світлового потоку. Та й зображення, що формується об'єктивом, часто складається як з яскраво освітлених ділянок, так і з глибоких тіней, а сенсор повинен вміти реєструвати всі їх відтінки. У цьому разі потрібно, щоб камера мала досить великий динамічний діапазон, межами якого є нижній та верхній пороги чутливості - мінімальна ( $E_{\min}$ ) та максимальна ( $E_{\max}$ ) освітленості світлочутливої матриці, між якими світлова характеристика пікселя - залежність вихідної напруга від добутку освітленості на час експозиції  $U=f(Et_{\text{exp}})$  - залишається із заданою точністю лінійною.

Нижній поріг чутливості визначається кількістю інформаційних електронів, за якої відношення потужностей сигналу та шуму на виході пікселя дорівнює одиниці. Якщо в шумах пікселя домінує шум зчитування, то можна за нижній поріг чутливості взяти освітленість  $E_{\min}$ , за якої під дією світла у пікселі за час експозиції  $t_{\text{exp}}$  накопичується  $N_{\text{read}}$  електронів, де  $N_{\text{read}}$  - шум зчитування заряду з пікселя, виражений в електронах.

Верхній поріг чутливості залежить від кількості електронів, яку може вмістити потенціальна яма пікселя. У сучасних датчиках зображення потенціальні ями пікселів вміщують до  $10^5$  електронів.

Кількість електронів у пікселі  $N_{\text{sat}}$  за якої порушується пропорційність між освітленістю та вихідним сигналом, називають сигналом насичення (англ. *saturation signal*). Цій кількості електронів на конденсаторі (перетворювачі інформаційного заряду у вихідний сигнал) відповідає напруга насичення  $U_{\text{sat}}$ . Нелінійність фотовідгуку пікселя, наприклад 1 %, означає, що за зміни вихідного сигналу в межах 2-90% від  $U_{\text{sat}}$  відносне відхилення світлової характеристики від лінійності не перевищує 1%.

*Динамічний діапазон* світлочутливої матриці — це виражене в децибелах відношення максимальної та мінімальної освітленості матриці, за якого спостерігається цифрове зображення. Якщо у шумах пікселя переважає шум

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 52   |

зчитування, можна записати, що динамічний діапазон сенсора зображення (у децибелах):

$$D_s = 20\lg \frac{E_{\max}}{E_{\min}} = 20\lg \frac{U_{sat}}{\sqrt{\bar{U}_n^2}} = 20\lg \frac{N_{sat}}{N_{read}},$$

де  $\sqrt{\bar{U}_n^2}$  - середньоквадратична напруга шумів на перетворювальному конденсаторі пікселя, викликаних шумом зчитування  $N_{read}$ . Наприклад: в паспортних даних КМОН інфрачервоного діапазону зазначено, що сигнал насичення  $N_{sat} = 245000$  електронів, а шум зчитування  $N_{read} = 10$  електронів. Динамічний діапазон ПЗЗ інфрачервоного діапазону знайдемо за формулою:

$$D_s = 20\lg \frac{N_{sat}}{N_{read}} = 20\lg \frac{245000}{10} = 87,7 \text{ дБ}.$$

Так само, як і в ФПЗС в КМОП-фотоприймачах максимальне значення зарядового пакета визначається, в основному, розміром фоточутливого елемента. Для більшості приладів це значення становить кілька сотень тисяч електронів, в окремих випадках - понад мільйон електронів. Мінімальне значення зарядового пакета, що відповідає значенню шуму зазвичай становить кілька десятків електронів. У деяких випадках це значення можна знизити до одиниць електронів. Таким чином, динамічний діапазон досягає значень 10000 - 1000000 (80 ÷ 120 дБ). В останньому випадку доцільно використовувати логарифмічний перетворювач, який може бути виконаний безпосередньо на кристалі приладу. Дуже істотним параметром є частота виведення інформації. Цей параметр визначається частотою опитування пікселів, яка в КМОП-фотоприймачах досягає значень 50 ÷ 100 МГц, що значно перевищує можливості ФПЗС.

У цифровій камері *Foveon X3* програмно реалізовано можливість звужувати динамічний діапазон датчика зображення у випадку, коли є великий перепад освітленості у сцені, наприклад, під час зйомки сонячного зимового дня, коли все, що перебуває в тіні, виглядав на фотознімку чорним.

**Чутливість.** Чутливість елемента фотоприймальної матриці, як і будь-якого іншого фотоприймача, поділяють на інтегральну та спектральну (монохроматичну).

Для матриць, які працюють з видимим випромінюванням, чутливість пікселя  $S_p$ , мВ/лк, визначається як відношення приросту напруги на виході підсилювача датчика зображення  $\Delta U$  до приросту освітленості пікселя  $\Delta E_v = 1$  лк:

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 53   |

$$S_p = \frac{\Delta U}{\Delta E_v}.$$

Більш об'єктивною характеристикою чутливості, яка не залежить від спектра випромінювання, є відношення приросту напруги до приросту енергетичної освітленості  $\Delta E_e = 1 \text{ мкДж/см}^2$ :

$$S_p = \frac{\Delta U}{\Delta E_e},$$

що вимірюється у  $\text{В}\cdot\text{см}^2/\text{мкДж}$ . У найбільш чутливих датчиків ця величина перевищує  $500 \text{ В}\cdot\text{см}^2/\text{мкДж}$ .

Для оцінювання порогової чутливості датчика зображення часто використовують такий параметр, як квантовий еквівалент шуму (англ. *noise equivalent quanta*, *NEQ* - кількість фотонів, еквівалентна шуму). *Квантовий еквівалент шуму* показує, скільки потрібно фотонів на одиницю площі датчика зображення, щоб досягти заданого відношення сигнал/шум на його виході.

Якщо сумарний шум на виході пікселя (дисперсія вихідної напруги  $U$ ) має потужність  $\sigma_U^2$ , то квантовий еквівалент шуму можна подати як

$$NEQ = \frac{\sigma_U}{\eta_e \eta_{Q \rightarrow U}}.$$

Із квантовим еквівалентом шуму тісно пов'язаний такий параметр, як виявна квантова ефективність (англ. *detective quantum efficiency*, *DQE*):

$$DQE = \frac{NEQ}{q}.$$

де  $q$  – кількість фотонів, які падають на одиничну площу датчика зображення або фотоприймача за час експозиції.

*Виявна квантова ефективність* датчика зображення показує, наскільки повно, порівняно з ідеальним датчиком, передається інформаційний вміст зображення. Для фотоприймача цей параметр оцінює зменшення відношення сигнал/шум у процесі перетворення оптичного сигналу в електричний.

Розрахуємо виявну квантову ефективність фотоприймача з ефективністю перетворення  $\eta_c = 0,7$  відліків/фотон реєструє потік випромінювання  $\Phi_q = 5$  фотонів/с протягом часу експозиції  $t=3$  хв. Темновий шум має дисперсію  $\sigma_d^2 = 0,1$

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 54   |

відліків/с, пропорційну часу експозиції, а шум зчитування за цей час залишається незмінним:  $\sigma_r^2 = 10$  відліків [14].

Середню кількість фотонів  $\bar{q}$ , які потрапляють на фотоприймач за час експозиції, візьмемо за вхідний сигнал  $S_{in}$ :

$$S_{in} = \bar{q} = \Phi_q t = 5 \cdot 3 \cdot 60 = 900 \text{ фотонів.}$$

Вхідним шумом є стандартне відхилення від цієї величини:

$$N_{in} = \sqrt{\bar{q}} = \sqrt{900} = 30 \text{ фотонів.}$$

Тоді на вході відношення сигнал/шум:

$$\left( \frac{S}{N} \right)_{in} = \frac{\bar{q}}{\sqrt{\bar{q}}} = \frac{900}{30} = 30.$$

Кількість імпульсів на виході фотоприймача за час експозиції:

$$S_{out} = \eta_c \bar{q} = 0,7 \cdot 900 = 630.$$

Шум на виході фотоприймача має три складові – темновий шум, шум зчитування та пуассонівський шум зареєстрованих відліків. Дисперсію вихідного шуму можна обчислити таким чином:[14]

$$\sigma_{Nout}^2 = \sigma_d^2 t + \sigma_r^2 + S_{out} = 0,1 \cdot 3 \cdot 60 + 10 + 630 = 658,$$

а стандартне відхилення – як  $\sigma_{Nout} = \sqrt{658} = 25,7$ .

Відношення сигнал/шум на виході фотоприймача:

$$\left( \frac{S}{N} \right)_{out} = \frac{S_{out}}{\sigma_{Nout}} = \frac{630}{25,7} = 25.$$

Виявну квантову ефективність можна знайти як

$$\eta_{DQE} = \left[ \frac{(S/N)_{out}}{(S/N)_{in}} \right]^2 = \left( \frac{25}{30} \right)^2 = 0,69.$$

Зі зменшенням площі фоточутливого елемента менша кількість фотонів потрапляє в елемент, і відповідно в потенціальній ямі під затвором накопичується менше електронів. Чутливість матриці завжди менша за чутливість її елемента, тому що між фоточутливими елементами є проміжки, заповнені електродами. Процентне відношення площі фоточутливих елементів до площі матриці називають *коефіцієнтом заповнення*, який характеризує здатність матриці ефективно збирати світло на фоточутливі елементи.

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 55   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

### Темновий струм.

Головним чинником, що обмежує поріг чутливості, є темновий струм (англ. *dark current*). «Темновим» струм називається тому, що складається з електронів, що потрапили в яму при повній відсутності світлового потоку.

У професійній фотографії тривалість експозиції часто вимірюється десятками секунд. У цьому випадку густина темнового струму має бути меншою за 1 пА/см<sup>2</sup>. Поки що ПЗЗ-технологія дозволяє отримувати матриці з темновим струмом 6 пА/см<sup>2</sup>, а КМОН-технологія - 100 пА/см<sup>2</sup> [32]. Темновий струм подвоюється у разі підвищення температури на 6-7 К. Тому для охолодження матриці використовуються різні системи відводу тепла (охолодження) [18].

**Ефективність перетворення заряду в напругу.** За малої освітленості фоточутливої матриці датчик працює в режимі накопичення заряду. Заряд накопичується або безпосередньо на ємності фотодіода, або на спеціально призначеному для цього конденсаторі. В обох випадках відбувається перетворення інформаційного заряду в напругу. Ефективність перетворення заряду окремим конденсатором перевищує 30мкВ/е, а ємністю фотодіода - до 4 мкВ/е залежно від його площі світлочутливої поверхні. Для перетворення заряду в напругу використовують конденсатори ємністю 8-10 фФ; ємність фотодіода теж може бути рівною декільком фемтофарадам [18].

Заряд перетворюється в напругу завдяки «плаваючому» діоду або «плаваючій» дифузійній області. Діод, працюючий як конденсатор, попередньо заряджається до опорної напруги. Його заряд частково розряджається перенесеним сигнальним зарядовим пакетом. Різницю напруг між кінцевим і початковими станами діода прямо пропорційна середньому значенню числу фотоелектронів  $\bar{n}_\phi$ . В цьому випадку напруга вихідного імпульсу буде обчислюватись:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{оп}} - U_3 = \bar{n}_\phi \frac{K\bar{e}}{C},$$

де  $\bar{n}_\phi$  - число фотоелектронів,  $U_{\text{оп}}$  – опорна напруга на діоді при скиданні,  $U_3$  – напруга, яка визначається зарядовим пакетом,  $K$  – коефіцієнт підсилення транзисторного каскаду (зазвичай  $K \approx 1$ ,  $\bar{e}$  - заряд електрона, рівний  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл).

**Частотно-контрастна характеристика.** Частотно-контрастна характеристика (ЧКХ) або інакше – модуляційна передатна функція (англ. *modulation*

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 56   |



*transfer function, MTF*) показує, як знижується контраст у найдрібніших деталях зображення.

Для зняття ЧКХ використовують штрихову міру - тестовий об'єкт у вигляді скляної пластини, на яку нанесено системи паралельних чорних смуг завширшки півперіоду з різною просторовою частотою. Чим дрібніша деталь предмета, тим вищі просторові частоти мають бути пропущені оптоелектронною системою, щоб ця деталь чітко відображалася у вихідному зображенні.

На просторовій частоті  $\xi$  значення передатної функції модуляції визначають за формулою:

$$MTF(\xi) = \frac{(U_{\max} - U_{\min}) / (U_{\max} + U_{\min})}{(E_{\max} - E_{\min}) / (E_{\max} + E_{\min})} \cdot 100\%,$$

де  $U_{\max}$ ,  $U_{\min}$  – максимальна та мінімальна напруги вихідного сигналу пікселя відповідно;  $E_{\max}$ ,  $E_{\min}$  – максимальна та мінімальна освітленості пікселя відповідно.

Як ми бачимо, значення  $MTF(\xi)$  є відношення глибини модуляції вихідного електричного сигналу пікселя до глибини модуляції його вхідного оптичного сигналу.

Якщо порівнювати зображення міри з  $MTF = 100$  та  $50\%$ , то в останньому зображенні чорні смуги виглядатимуть як темно-сірі, а білі - як світло-сірі, із контрастом зображення  $50\%$ .

**Оптичний формат матриці.** *Оптичний формат матриці* - це діагональний розмір світлочутливого поля матриці, який виражається в дюймах або міліметрах.

Для прикладу, КМОН оптичного формату 1 дюйм (25,4 мм) має діагональ фоточутливої області рівну 16,9 мм (або  $2/3$  від 1 дюйма). Тобто геометричний розмір діагоналі фоточутливої області матричного фотоприймача становить дві третини від геометричного розміру оптики і пов'язано це з необхідністю усунути неоднорідності оптичної лінзи, що утворюються на її краях.

Типові оптичні формати матриць КМОН, що використовуються в даний час, наведені в таблиці. 3.2.

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 57   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

## Оптичні формати КМОН матриць

| Фізичні розміри КМОН матриць |                                |               |             |
|------------------------------|--------------------------------|---------------|-------------|
| №                            | Діагональ у відиконових дюймах | Діагональ, мм | Розмір, мм  |
| 1                            | 13/8'' (плівка типу 135)       | 43,27         | 36 × 24     |
| 2                            | APS-H Canon                    | 33,75         | 28,1 × 18,7 |
| 3                            | APS-H Leica                    | 32,45         | 27 × 18     |
| 4                            | APS-C                          | 28,5          | 23,7 × 15,6 |
| 5                            | APS-C Canon                    | 26,82         | 22,3 × 14,9 |
| 6                            | Foveon X3                      | 24,88         | 20,7 × 13,8 |
| 7                            | 1,5"                           | 23,4          | 18,7 × 14,0 |
| 8                            | 4/3"                           | 21,64         | 17,3 × 13,0 |
| 9                            | 1"                             | 16            | 12,8 × 9,6  |
| 10                           | 2/3"                           | 11,85         | 8,8 × 6,6   |
| 11                           | 1/1,63"                        | 10            | 8,0 × 6,0   |

## ВИСНОВОК

Розглянуто методи утворення кольорового зображення в ПЗЗ-матрицях використовують масиви фільтрів колірної моделі Баєра (RGB-модель). Варіаціями фільтра Баєра є фільтри: RGBE-, RGBW-, CYGM- та CYUM-фільтри.

В обох типах матриць ПЗЗ- та КМОН- використовують технологію кольорового зображення з використанням Foveon X3. Технологія повноколірної RGB матриці для КМОН має перевагу в ефективності використання світлового потоку, 1.5-кратне порівняно з елементами фотосенсорів RGBW.

Розглянуто такі параметри КМОН-ФД-датчиків: абсолютний показник якості, спектральний діапазон, квантова ефективність, просторова роздільна здатність, глибина кольору, динамічний діапазон, чутливість, темновий струм, ефективність перетворення заряду в напругу. Частотно-контрастна характеристика показує, як знижується контраст у найдрібніших деталях зображення. Оптичний формат матриці вимірюється в дюймах або міліметрах.

## ГЛАВА 4. ПРИЛАДОВО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФД КОМІРКИ ФОТОЧУТЛИВИХ КМОН- ФД МАТРИЦЬ

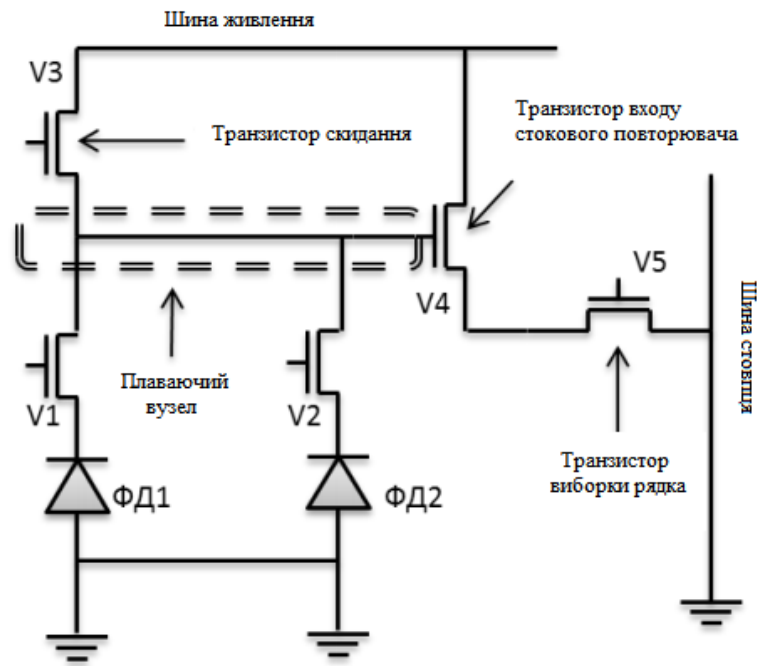
Одним з найбільших напрямків в області фотоприймачів видимого діапазону є фоточутливі НВІС на КМОН-фотодіодних матрицях (КМОН-ФД НВІС) з внутрішньою кристалльною обробкою зображень. У такій НВІС на одному кристалі можуть бути реалізовані як прийом зображення в різних режимах, так і аналогова, і цифрова внутрішньою кристалльною обробки зображень [19]. З початку 21 століття КМОП-ФД НВІС поступово стають домінуючою елементної базою більшості систем прийому та обробки оптичної інформації, перш за все, через доступність КМОН-технології для широкого кола розробників і можливості створення замовних схем із заданими функціями. Як і для фоточутливих НВІС на приладах із зарядовим зв'язком (ФПЗЗ), ключовим етапом проектування КМОН-ФД НВІС є проектування її фотоприймальної комірки.

Оптимальне конструкторсько-технологічне рішення комірки знаходиться шляхом не автоматизованого перебору параметрів технологічного процесу і топології. Критерієм оптимальності конструкції комірки слугує досягнення максимального вихідного сигналу комірки, максимального динамічного діапазону комірки.

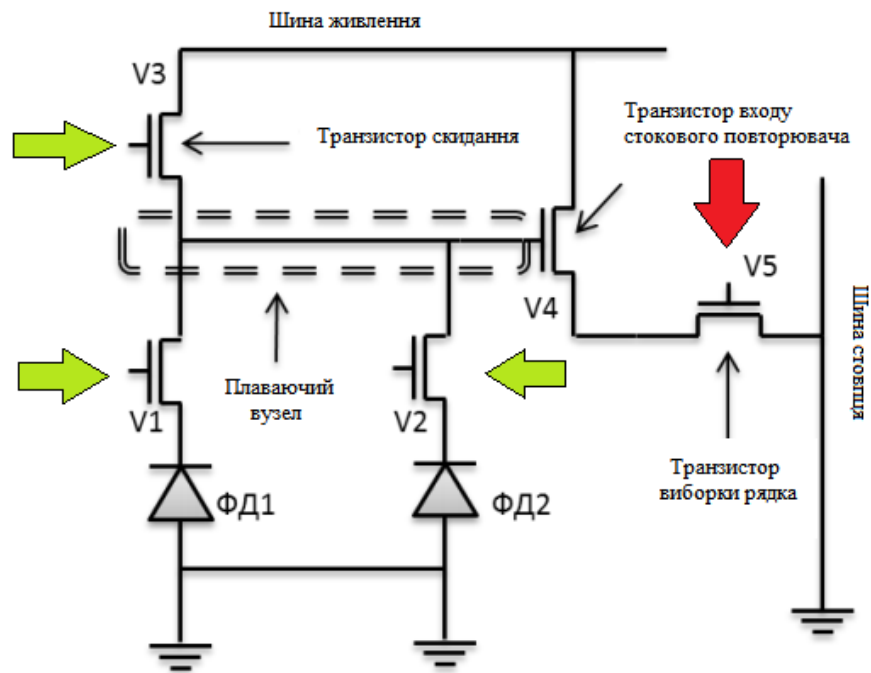
### 4.1. Принцип роботи ФД комірки КМОН-ФД матриці

Модельована фоточутлива комірка, має в своїй основі комірку два з половиною КМОН-ФД «два з половиною транзистора на комірку» (2,5 Т), схема приведена на рисунку 4.1. Відмінною особливістю даної схеми є загальні для двох фоточутливих елементів транзистор скидання V3, транзистор стокового повторювача V4 і транзистор вибірки стовпця V5.

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 59   |



а)



б)

Рис. 4.1. Фотоприймальна комірка КМОН-ФД 2,5Т: а) схема 2,5Т комірки КМОН-ФД; б) електрична схема 2,5Т комірки КМОН-ФД.[19]

Принцип роботи фоточутливої комірки 2.5Т (рис. 4.1,а).

1. Імпульс  $TG1=0$ , фотодіоди накопичують сигнальний заряд.

2. На затвор транзистора V3 подається імпульс  $R=1$ , транзистор відкривається і потенціал плаваючого вузла відновлюється до початкового рівня.
3. На затвор транзистора V1 надходить сигнал  $TG1=1$ , транзистор відкривається і сигнальні електрони попадають в плаваючий вузол.

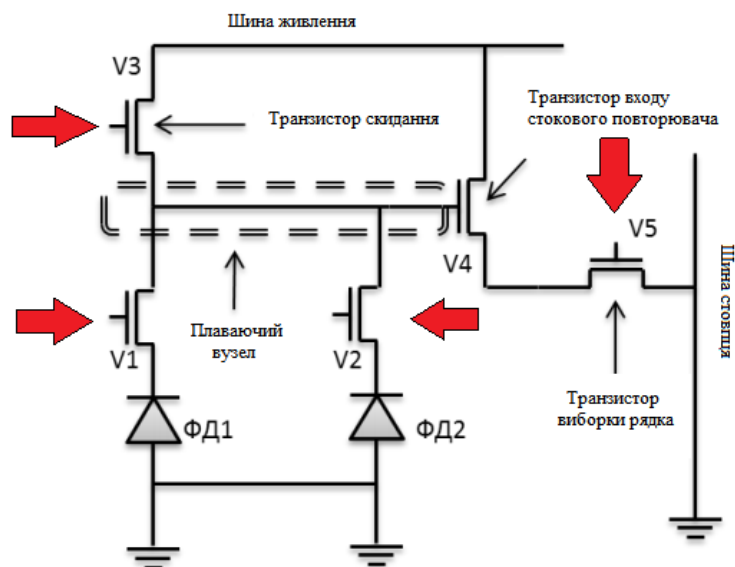


Рис. 4.2. Електрична схема 2,5Т комірки КМОН-ФД

4. На транзистор V5 надходить сигнал  $RS=1$ , транзистор відкривається і сигнальний заряд від першої комірки передається на шину стовбця.
5. Після зчитування плаваючий вузол знову відновлюється, і всі описанні вище операції повторюються вже для другої комірки.

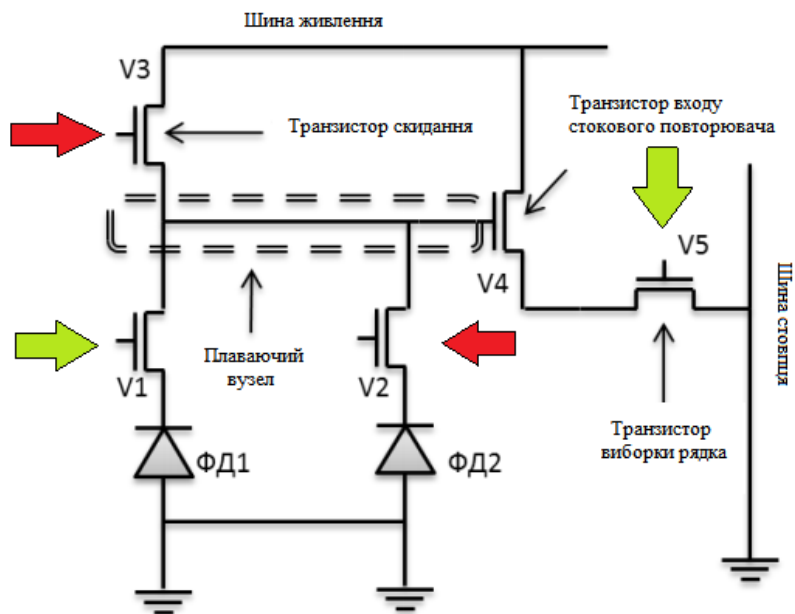


Рис. 4.3. Електрична схема 2,5Т комірки КМОН-ФД

#### 4.2. 2Д-модель структури фотоприймальної комірки КМОН-ФД.

Приладово-технологічному моделюванні КМОП-ФД комірки для коректного вирахування як профілю домішки, так і топології, необхідно вирішувати тривимірну задачу. Однак, тривимірне моделювання для застосування в рамках практичного проектування саме фотоприймальних комірок не підходить з очевидних міркувань: неавтоматизована оптимізація комірки шляхом перебору десятків варіантів займе багато обчислювального часу і, одночасно, багато часу буде потрібно на «ручну» зміну і налагодження моделі структури осередку [20]. Для неавтоматизованої оптимізації перебором більш підходить двовимірний модель, що дає можливість оперативного внесення змін в об'ємну структуру осередку і володіє можливістю обліку її реальної топології.

Розглянемо можливість створення двовимірної моделі КМОН-ФД фотоприймальної комірки, яка коректно враховує площі елементів фотоприймальної комірки в площині топології.

Двовимірне моделювання також активно використовується для оптимізації елементів КМОН-ФД. На основі двовимірного аналізу для збільшення чутливості світлочутливої осередку КМОН-ФД з фотозатвором була запропонована конструкція «multifinger», в якій стандартний фотозатвор був замінений декількома фотозатворами, що лежать поверх світлочутливої області на деякій відстані один від одного. Ідея полягає в тому, що крайові поля від фотозатворів будуть продовжувати потенційну яму за межі фотозатвору і збирати носії з проміжку між ними. Завдяки двовимірному моделюванню були розраховані профілі розподілу крайових полів в структурі, що були головними інструментом оптимізації конструкції комірки.[21]

Так само двовимірне моделювання може використовуватися для зменшення відставання (змазування) зображення. Затримкою зображення називається явище, при якому деякі сигнальні електрони не можуть бути повністю передані в вузол зберігання і залишаються в регіоні фотодіода. Ці електрони згодом передаються в наступні кадри як затримка зображення. Проблема затримки зображення в фотоприймальній комірці змодельована за допомогою двовимірної моделі, створеної в середовищі ISE-TCAD. Було висловлено припущення, що затримка зображення пов'язана з граничною напругою  $V_t$  на передавальному затворі. Шляхом зміни

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 62   |

концентрації домішки в каналі, кута введення домішки n-типу і дози, і також робочої напруги передачі електронного сигналу, були досягнуті оптимальні параметри процесу передачі сигнальних електронів, що дозволило зменшити затримку зображення.

Для вирішення поставленого завдання необхідно створити структуру, в якій будуть симулювати процес накопичення заряду фотодіодом, процес переносу заряду з фотодіода в плаваючий вузол, і процес скидання заряду з фотодіода і плаваючого вузла рис. 4.4. На основі наявної топології розроблена 2D-структура пікселя, що включає в себе: ПВ, ФД, стік Т4 і витоки Т1 і Т2.

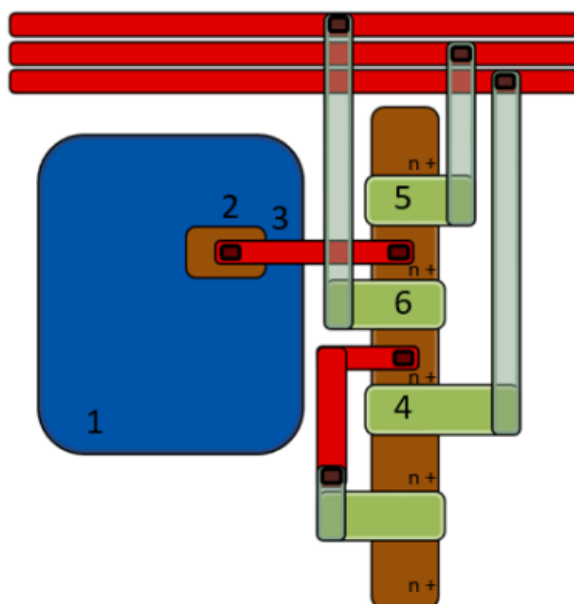


Рис.4.4. Топологія 2,5Т фотоприймальної комірки КМОН-ФД, де 1- фотодіод, 2- контакт фотодіода, 3 - електрод, який з'єднує фотодіод стоком передавального транзистора V1, 4- затвор відновлення плаваючого вузла V3, 5 – затвор відновлення фотодіода, 6 – затвор перенесення транзистора V1.





інструмент, через який можна було б регулювати або розміри областей комірки в моделі, або їх ємність.

Тому розроблені три прийоми для побудови двовимірної моделі КМОН-ФД комірки.

**Прийом 1:** область моделювання формувати як складений двовимірний перетин комірки (площина перетину перпендикулярна площині поверхні кристалу). У нього повинні входити перетини, що проходять через області комірки, які визначають перетворення заряд-напруга і не мають об'ємного польового і зарядової взаємодії.

**Прийом 2:** врахування реальних площ і, відповідно ємностей елементів комірки, здійснюється шляхом зміни розмірів елементів комірки в області моделювання.

**Прийом 3:** врахування реальних ємностей елементів комірки, здійснюється шляхом введення в модель структури додаткових ємнісних елементів, що підключаються до основних елементів комірки.

**Перший варіант моделі** (рис.4.7). Побудова 2Д-моделі структури фотоприймальної комірки КМОН-ФД (прийом 1) повністю описаний вище. Потім застосовується прийом 2: довжина області ФД по горизонтальній осі X, згідно простої пропорції площ ФД і ПВ, встановлюється рівною:

$$L_x \Phi Д = L_x \Phi Д \cdot \left( \frac{L_z \Phi Д}{L_z ПВ} \right) (\text{мкм}).$$

Третій прийом для даного варіанту моделі структури не застосовується. Така модель є досить простою, так як не вимагає підключення до структури додаткових ємнісних елементів. Однак, для областей з великими розмірами по координаті Z, (перпендикулярній вертикальній площині перетину структури), відбувається значне збільшення розміру нової структури і, відповідно, кількості вузлів сітки. При цьому стає складним швидко змінити ємності ПВ і ФД, так як це вимагає редагування всієї структури.[21]

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 65   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

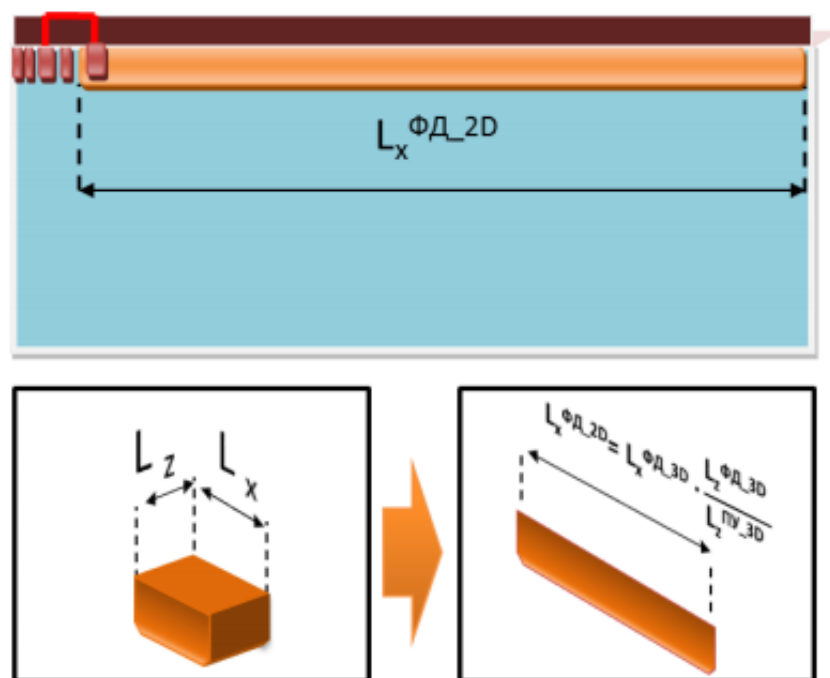


Рис.4.7. Перший варіант моделі.

**Другий варіант моделі.** У даній моделі до області плаваючого вузла і фотодіода приєднуються додаткові металеві затвори. Ці затвори утворюють паралельно з'єднані з областями ПВ і ФД МОН-конденсатори. За допомогою даних конденсаторів задаються ємності ПВ і ФД, що відповідатимуть їхнім реальним ємностям в структурі пікселя, які визначаються їх розмірами в площині топології.

Така структура краща за першу, так як розміри фотодіода з координування X не змінюються. Для реалізації додаткової ємності для ПВ і ФД додатково створюються два МОН конденсатора. Вони виконуються у вигляді високолегованих областей в підкладці за межами активної області, тонкого (близько 5нм) оксиду і двох металевих затворів, приєднаних до областям ПВ і ФД. «Регулювати» ємність такої структури не складно шляхом зміни розмірів МОН-конденсатора. Даний варіант структури представлений на рис. 4.8.

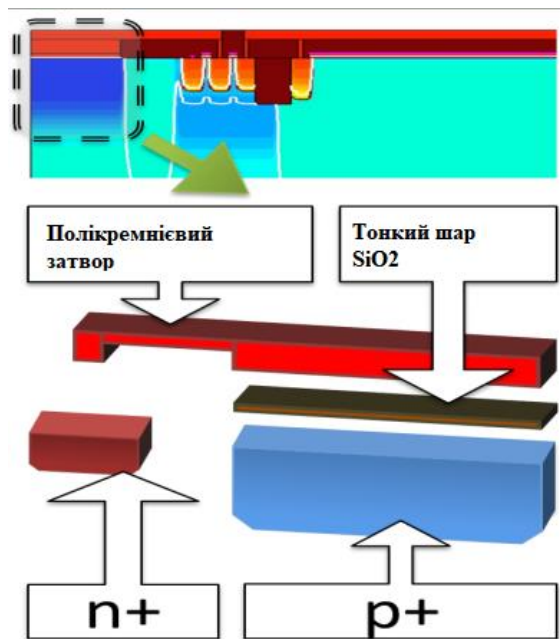


Рис. 4.8. Другий варіант структури КМОН-ФД комірки з фотозатвором

**Третій варіант моделі.** До областей ПВ і ФД підключені шари металу, але на відміну від другого варіанту, вони не виконані у вигляді МОН-конденсаторів. Ці шари «підвішені в повітрі», і зверху, через тонкий шар оксиду (частки нанометра) до кожного з них приєднані металеві контакти. До цих контактах, в свою чергу, підключаються конденсатори як елементи зовнішньої ланцюга, рис. 4.9.

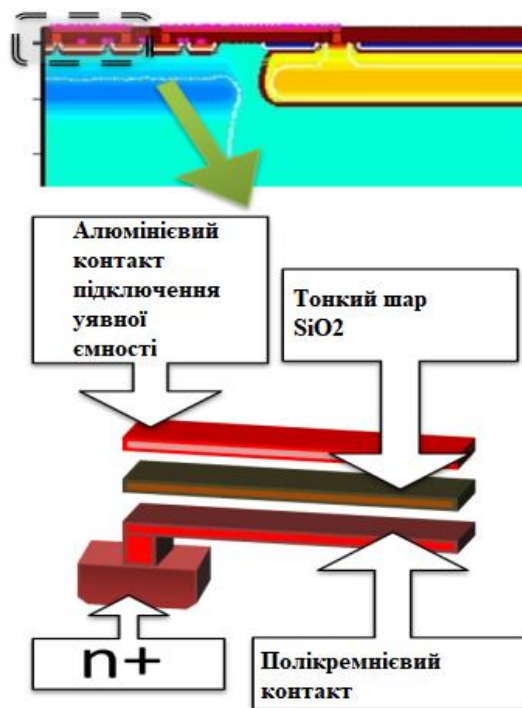


Рис. 4.9. Третій варіант структури комірки з зовнішніми додатковими ємностями

#### 4.4. Порівняльний аналіз трьох моделей.

У моделі №1, яка не має додаткових ємностей, процес зміни величини ємності вузла передбачає зміну безпосередньо структури комірки, що вимагає зміна командного файлу технологічного моделювання в програмі DIOS і перерахунок технологічної моделі.

Модель №2 набагато економічніше першої по трудовитратах, однак теж має незручності: реалізовані в ній за допомогою редактора структури Structure Editor, МОН-конденсатори, підключені до вузлів ПВ і Т4, можуть бути змінені тільки через редагування файлу структури в цій же програмі. Перевагою моделі №2 є відсутність необхідності зміни командного файлу технологічного моделювання та подальшого перерахунку технологічного процесу моделі. Однак у даній моделі також є недолік: додатково введені  $p+$  області роблять модель структури фотоприймальної комірки великою за розмірами і кількістю дифузійних областей, що збільшує час електрофізичного моделювання, як наслідок збільшення кількості вузлів в моделі.

Модель №3 позбавлена недоліків попередніх варіантів моделей №1 та №2. Технологічна модель, так само як і модель структури в Structure Editor, створюються один раз, і більше в процесі експлуатації не редагуються. Для зміни підключеної до вузла ємності необхідно просто вписати необхідну величину ємності в файл електрофізичної моделі. Таким чином, відпадає необхідність редагування файлу технологічного моделювання для програми DIOS і наступного перерахунку технологічної моделі, відпадає необхідність редагування файлу структури в програмі Structure Editor. Крім того, модель не має додаткових  $p+$  областей, що робить її більш компактною, а так само забезпечує велику швидкість розрахунків електрофізичних параметрів структури.

Швидкості розрахунків електрофізичних параметрів для трьох моделей представлені в таблиці 1.

Таблиця №4.1.

Затрати часу на розрахунки електрофізичних параметрів.

|   | Модель №1        | Модель №2         | Модель №3       |
|---|------------------|-------------------|-----------------|
| Час, який потрібний для зміни ємності елементу структури. | Більше 30 хвилин | Близько 10 хвилин | Декілька секунд |

|  |                     |                      |                      |
|--|---------------------|----------------------|----------------------|
| Швидкість розрахунків<br>електрофізичних параметрів. | Більше 60<br>хвилин | Близько 40<br>хвилин | Близько 20<br>хвилин |
| Розмір моделі по вісі X (мкм).                       | 9230                | 110                  | 90                   |

Очевидно, що модель №1, що має найбільші розміри структури з усіх трьох, має саму повільну швидкість розрахунку технологічної та електрофізичної моделі. Розміри трьох моделей наведені в таблиці 4.1. Також, для наочного порівняння, для трьох моделей в таблиці 4.1 наведений приблизний час, який потрібний для зміни величини підключених зовнішніх ємностей. Як видно з таблиці, модель №3 дає можливість миттєвої зміни величини ємності, на відміну від першої і другої моделі.

#### 4.5. Кінцева модель структури.

Перший варіант є найпростішим в практичній реалізації. Взявши топологічні розміри областей ФД, витоку і стоку M1, як розмір по осі x береться повна площа кожного елемента. Таким чином ємність кожного елемента переноситься в плоску структуру рис. 4.5.

Плюсами даної моделі є проста побудова структури, без підключення додаткових елементів до комірки. Мінусами ж є збільшення розмірів моделі, а разом з тим і кількості вузлів сітки, що призведе до значного збільшення часу розрахунків, а так само неможливість швидкої зміни ємності ПВ і ФД.

Другий варіант набагато краще першого хоча б тому, що фотодіод стає більш компактним. Для реалізації додаткової ємності для ПВ і ФД в моделі додатково створюються два МОН конденсатора. Вони виконуються високолегованої областями в підкладці за межами активної області, тонким (близько 5нм) оксиду і двома металевими затворами, приєднаними до областям ПВ і ФД. Регулювати ємність такої структури можна шляхом зміни фізичних розмірів МОП-конденсатора.

Модель даної комірки була зроблена в якості тестової моделі (рис. 4.10). В основу моделі лягла трьох-транзисторна (3Т) комірка КМОН-ФД з фотозатвором.

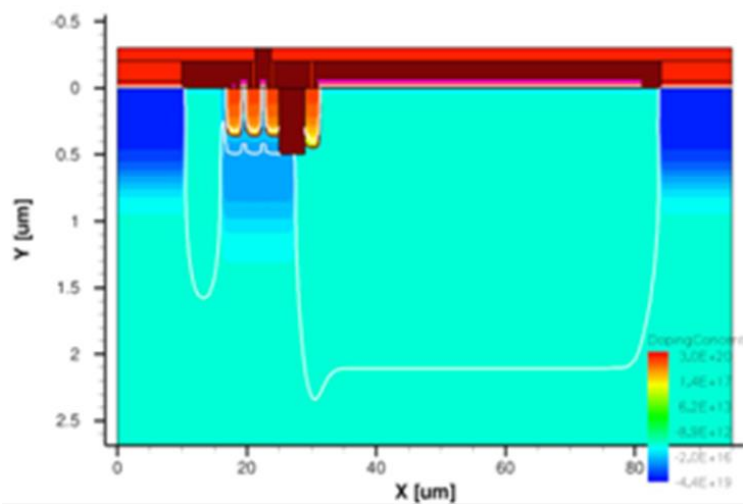


Рис.4.10. Структура комірки, змодельована в програмі TCad.

Плюсами моделі є можливість регулювання ємності вузлів ПВ і ФД, менший (в порівнянні з попередньою коміркою) розмір моделі. Мінусом же є не досить точне і швидке регулювання ємності областей ПВ і ФД.

Модель №2 є працездатною. Командні файли для технологічного моделювання та електрофізичного моделювання міститися відповідно в додатку №1 та додатку №2.

Модель №3 (рис. 4.12) є модель активної комірки, в якій до областей ПВ і ФД підключені затвори, але на відміну від попереднього варіанту, вони не виконані у вигляді МОН-транзисторів. Замість цього вони «підвішені в повітрі», і зверху, через тонкий шар оксиду (частки нанометра) до кожного з них приєднані металеві контакти. До цих контактах в свою чергу підключаються «віртуальні» конденсатори необхідної ємності.

Модель №3 є працездатною. Командні файли для технологічного моделювання та електрофізичного моделювання міститися відповідно в додатку №3 і додатку №4.

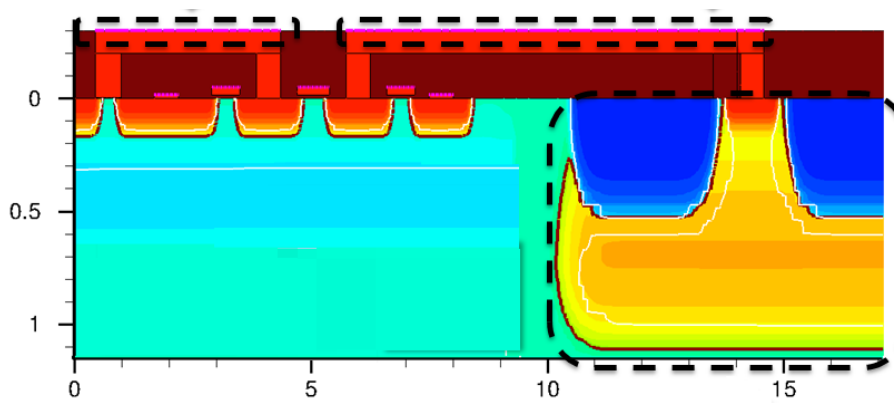


Рис.4.11. Структура комірки, змодельована в програмі TCad.

## ВИСНОВКИ

В результаті моделювання була розроблена двовимірна модель, що дає можливість оперативного внесення змін в об'ємну структуру осередку і володіє можливістю обліку її реальної топології).

В процесі розробки методу були запропоновані і досліджені три варіанта побудови моделі структури КМОН-ФД комірки, які відрізняються способом задання ємності фотодіода і плаваючого вузла.

За результатами створених моделей дійшли висновку, що модель №3 найкраще підходить для швидкого неавтоматизованого перебору параметрів технологічного процесу і її топології. Це видно із отриманих значень затрат часу на розрахунки електрофізичних параметрів: модель №3 дає можливість майже миттєвої зміни величини ємності, на відміну від першої і другої моделі.

## ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПО КІНЦЕВІЙ МОДЕЛІ СТРУКТУРИ КМОН-ФД КОМІРКИ

Для коректної роботи пікселя КМОН-ФД матриці була створена тимчасова діаграма керуючих імпульсів (рис. 5.1). На її основі в командному файлі були задані часи подачі імпульсів і їх величини для кожного контакту.

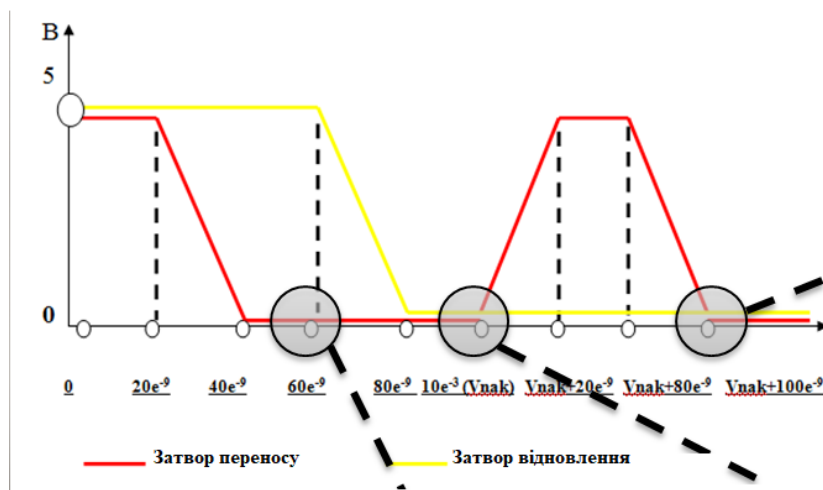


Рис. 5.1. Діаграма імпульсів управління

В умовах роботи була задана температура середовища 250 К.

В параметрах падаючого світла були задані: довжина хвилі падаючого світла, потужність в якості змінного параметра, час висвітлення структури світлом, а так само ширина пучка світла і висота, з якої висвітлюється структура.

Таблиця № 5.1. Вхідні параметри моделювання експерименту

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| Довжина хвилі падаючого світла, нм | 535 |
| Час освітленості, с                | 0,1 |
| Температура середовища, К          | 250 |

Довжина хвилі падаючого світла була обрана 535нм, що відповідає максимуму чутливості у видимому діапазоні світла. Потужність світла згодом варіюється для різних експериментів. Час освітлення поверхні фотоприймального елемента 0,1 секунда. Цього часу достатньо, для накопичення заряду фотодіодом, при цьому електрофізичні параметри розраховуються досить швидко. Для ідеалізації моделі, на фотоприймальну комірку світло падає тільки на фотодіод, при цьому було так само виключено поглинання світла полікремневим затвором (табл. 5.1).

У точності розрахунків важливим параметром є кількість ітерацій. Чим більша кількість ітерацій, тим вище точність експерименту.

Для підвищення продуктивності розрахунки були розділені на вісім потоків, що дозволило скоротити час розрахунків електрофізичних параметрів моделі.

### 5.1. Результати двовимірного моделювання

Результатами розрахунків електрофізичних параметрів структури став двовимірний розподіл потенціалу. З його допомогою можна побачити наочно, яким був потенціал фотодіода і плаваючого вузла після накопичення заряду, і як змінився потенціал після завершення стадії передачі заряду.

У початковий момент часу перед освітленням структури, фотодіод і плаваючий вузол максимально збіднені, відповідно їх потенціал максимальний (рис. 5.2).



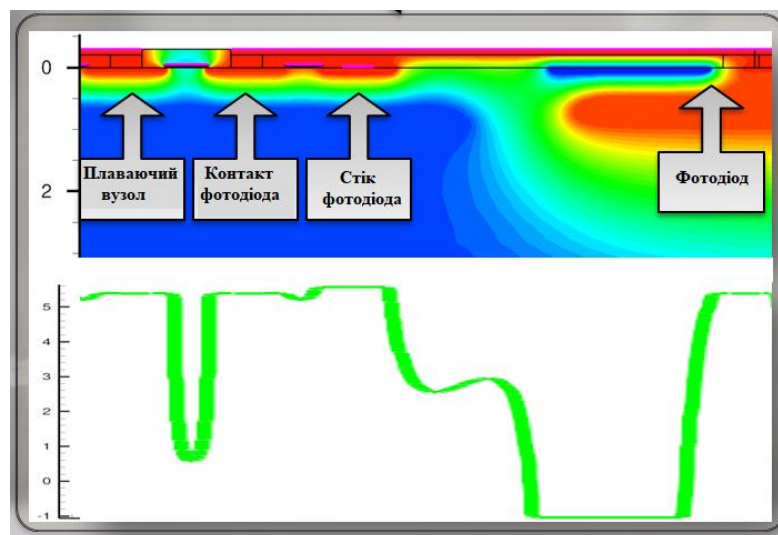


Рис. 5.2. Двовірний розподіл потенціалу моделі фотоприймальної комірки КМОН-ФД в момент часу перед освітленням структури

У момент часу  $t = 10e^{-3}$  секунди стадія накопичення заряду фотодіодом добігає кінця, відповідно потенціал фотодіода опускається на деяку величину (рис. 5.3).

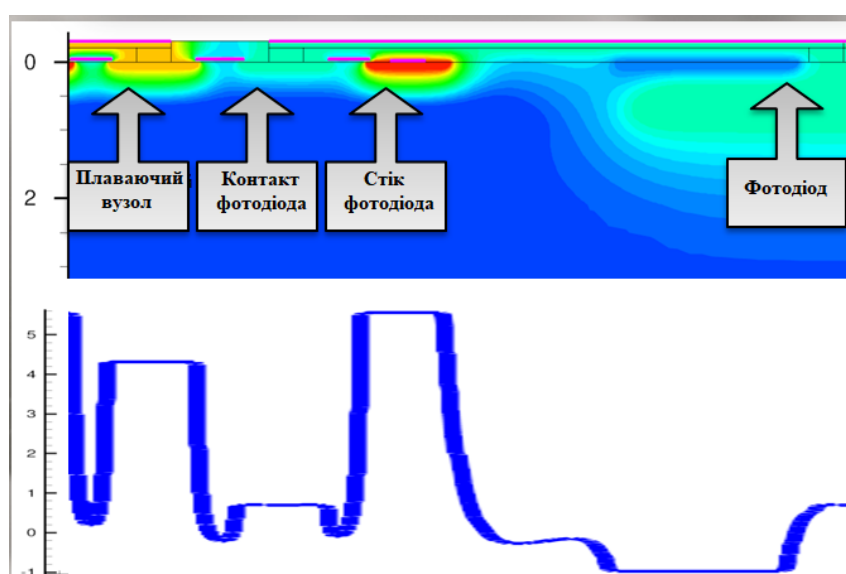


Рис. 5.3. Двовірний розподіл потенціалу моделі фотоприймальної комірки КМОН-ФД в момент часу  $t = 10e^{-3}$

У момент часу  $t = 10e^{-3} + 80e^{-9}$  стадія передачі заряду з фотодіода в плаваючий вузол підійшла до кінця, і потенціали плаваючого вузла і фотодіода вирівнялися (рис. 5.4).

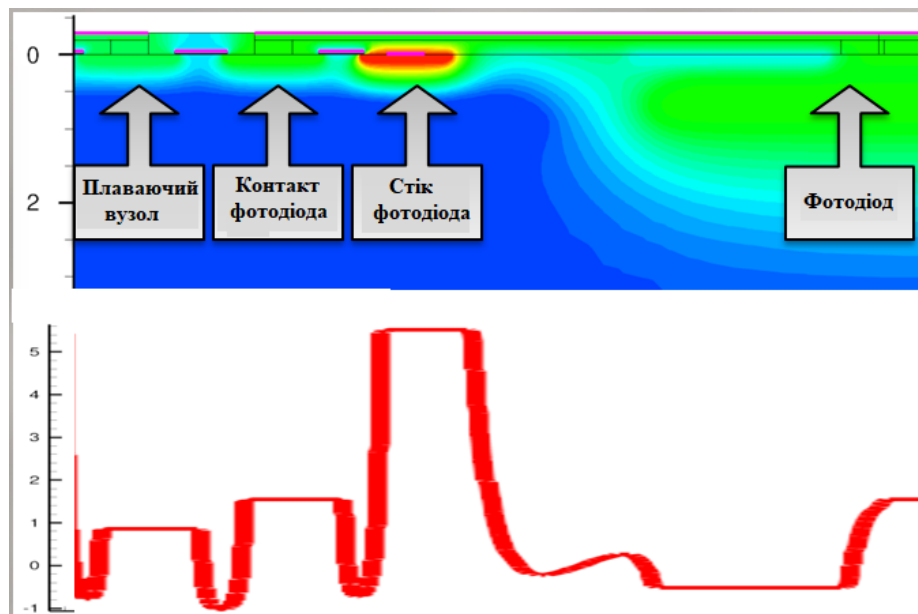


Рис. 5.4. Двовірний розподіл потенціалу моделі фотоприймальної комірки КМОН-ФД в момент часу  $t = 10\text{e}^{-3} + 80\text{e}^{-9}$

## 5.2. Результати моделювання світло-сигнальної характеристики

Світло-сигнальна характеристика (ССХ) - це залежність вихідного сигналу КМОН-ФД комірки, вираженого в вольтах, від питомої потужності вхідного випромінювання, вираженої в  $\text{Вт} / \text{см}^2$ , або люксах. За допомогою ССХ визначається важливий параметр якості комірки - динамічний діапазон (ДД) її вихідного сигналу:

$$\text{ДД} = 20 \cdot \log \left( \frac{U_{\max}}{U_{\min}} \right), \left[ \frac{\text{Вм}}{\text{см}^2} \right]$$

де  $U_{\max}$  – максимальний вихідний сигнал комірки [В],  $U_{\min}$  – мінімальний вихідний сигнал комірки [В]. Величини  $U_{\max}$  та  $U_{\min}$  визначаються із світло-сигнальної характеристики.

Однією з основних завдань проектування є максимізація динамічного діапазону фотоприймальної комірки КМОН-ФД матриці при заданих обмеженнях на параметри технологічного процесу і топологічних розмірів.

Вид світло-сигнальної характеристики залежить як від величини ємності фотодіода, що визначає фоточутливість комірки, так і від співвідношення ємностей плаваючого вузла та фотодіода, що визначає коефіцієнт перетворення «фотогенерований заряд - вихідна напруга».

За результатами моделювання побудовано три світло-сигнальні характеристики:

- Фотоприймальна комірка без підключених до неї ємностей.
- Фотоприймальна комірка для ряду віртуальних ємностей, підключених до плаваючого вузла.
- Фотоприймальна комірка для ряду віртуальних ємностей, підключених до фотодіода.

Світло-сигнальна характеристика, що демонструє роботу фотоприймальної комірки КМОП-ФД матриці представлена на рис. 5.5. Таблиця з даними значень потенціалу плаваючого вузла і фотодіода після закінчення стадії передачі заряду з фотодіода в плаваючий вузол, для експериментів з різною потужністю світла, приведена в додатку 5. З графіка можна визначити лінійну ділянку ССХ, відповідне освітлення, з якого можна визначити динамічний діапазон фотоприймальної комірки.

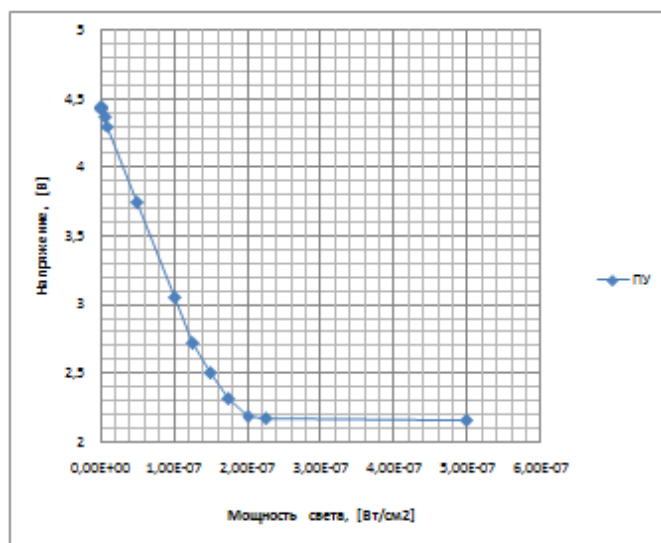


Рис. 5.5. Світло-сигнальна характеристика для фотоприймальної комірки КМОП-ФД матриці, яка знята з плаваючого вузла, без підключення додаткових ємностей

Графік на рис. 5.6 демонструє ССХ, побудовані для моделей з трьома різними ємностями, підключеними до плаваючого вузла. Таблиці з даними значень потенціалу плаваючого вузла і фотодіода після закінчення стадії передачі заряду з фотодіода в плаваючий вузол для експериментів, з різною потужністю світла, наведені в додатку 5. З графіка видно, що при збільшенні підключеної ємності напруга насичення плаваючого вузла збільшується.

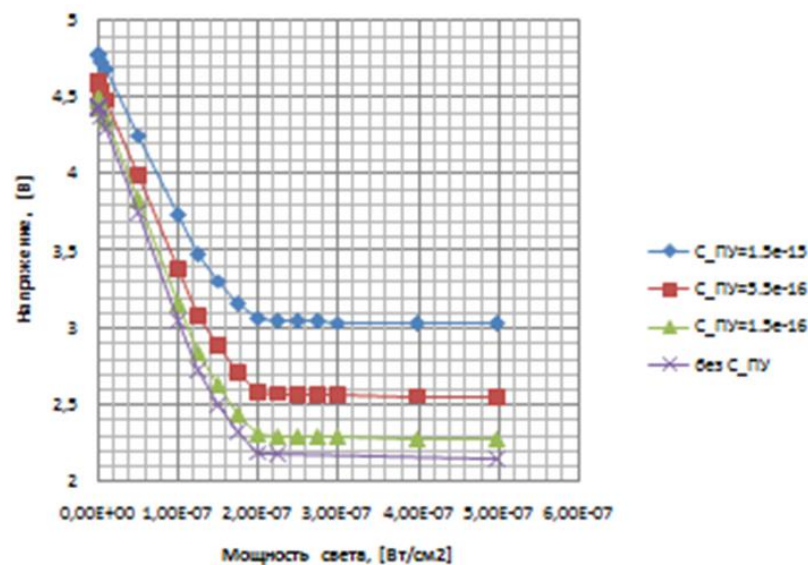


Рис. 5.6. Світло-сигнальна характеристика для фотоприймальної комірки, яка знята з плаваючого вузла, для трьох різних ємностей С<sub>Пв</sub>.

Графік на рис. 5.7 демонструє ССХ, побудовані для трьох моделей з різними ємностями, підключеними до Т4 (ФД). Таблиця з даними значення потенціалу плаваючого вузла і фотодіода після закінчення стадії передачі заряду з фотодіода в плаваючий вузол для експериментів з різною потужністю світла приведена в додатку 5. З графіка видно, що при збільшенні підключеної ємності напруга насичення плаваючого вузла збільшується.

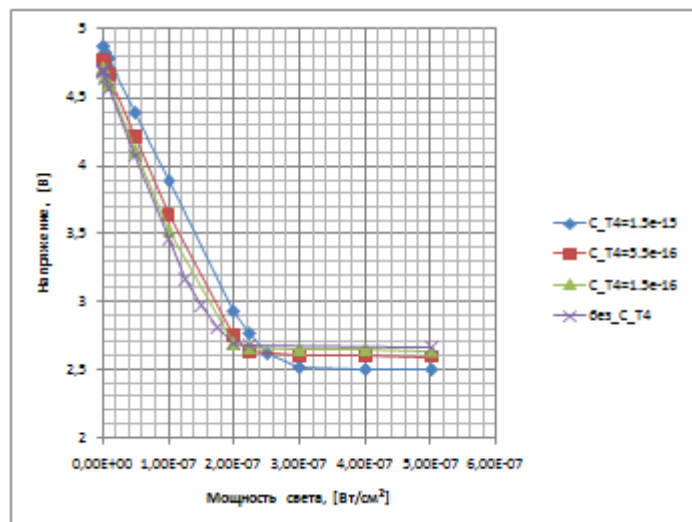


Рис. 5.7. Світло-сигнальна характеристика для фотоприймальної комірки, знята з плаваючого вузла, для трьох різних підключених ємностей С<sub>Т4</sub>.

В змодельованій конструкції комірки КМОН-ФД матриці світло-сигнальна характеристика більш чутлива до зміни ємності області плаваючого вузла: ємність ПУ менше ємності ФД, тому відносно невелика зміна ємності ПУ, призводить до

відчутної зміни величини вихідного сигналу, в області насичення світло-сигнальної характеристики.

### ВИСНОВКИ

В результаті моделювання комірки КМОН-ФД матриці, її світло-сигнальна характеристика більш чутлива до зміни ємності області плаваючого вузла: ємність ПУ менше ємності ФД, тому відносно невелика зміна ємності ПУ, призводить до відчутної зміни величини вихідного сигналу, в області насичення світло-сигнальної характеристики. Так як, динамічний діапазон залежить від співвідношення ємностей плаваючого вузла та фотодіода, можна зробити висновок структурна модель КМОН-ФД вірно змодельована і виконує основну поставлену задачу.

## ГЛАВА 6. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПІКСЕЛЯ КМОН ФД МАТРИЦІ

Основними структурними операціями технології виготовлення пікселя КМОН ФД матриці є (Додаток 1,2):

- Створення підкладки з заданою концентрацією домішки.
- Створення n-області фотодіода.
- Створення p+ карману для контактних областей.
- Створення p+ шару фотодіода.
- Створення контактних областей.

Введення іонів (іонна імплантація) в кремнієву підкладку для формування шарів з потрібною провідністю стало останнім часом основним методом легування напівпровідникових матеріалів, при створенні інтегральних схем та інших елементів. Більш детально технологія виготовлення фоточутливих матриць описана в бакалаврській дипломній роботі [22].

Процес іонного легування полягає в формуванні пучків іонів з однаковою масою і зарядом, що мають необхідну задану енергією, і введення їх в підкладку або мішені в певній кількості, званою дозою. Таким чином, основними характеристиками процесу є енергія і доза пучка іонів. Потрібну енергію  $E_0$  іон набуває під дією різниці потенціалів  $U$ :

$$E_0 = neU,$$

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 77   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

де  $n$  – кратність іонізації,  $n = 1, 2, 3$ ;  $e$  – заряд електрона. Наприклад,  $^{31}P^+$  означає, що вводиться одноразово іонізований (+) іон фосфору з атомною масою 31;  $BF_2^+$  - одноразово іонізована молекула фториду бору.

Доза іонів визначається кількістю частинок на одиницю площі:

$$N_0 = \frac{Q}{ne} = \frac{j}{tne} \left[ \frac{\text{іон}}{\text{см}^2} \right]$$

де  $Q$  – кількість домішки;  $j$  – густина потоку іонів. 1 мкКл/см<sup>2</sup> для  $n=1$  відповідно  $6,25 \cdot 10^{12}$  іон/см<sup>2</sup>.

Переважне використання іонного легування перед дифузійним дозволяє забезпечити:[22]

- контроль кількості домішки, що визначається струмом іонів під час легування;
- відтворюваність і однорідність розподілу домішки;
- можливість використання в якості маски при легуванні шарів  $SiO_2$  і  $Si_3N_4$ ;
- легування через тонкі шари діелектриків і резистивних матеріалів;
- знижену в порівнянні з дифузією температуру.

Разом з тим процес іонного легування супроводжується рядом явищ, для усунення яких необхідне використання спеціальних технологічних прийомів. В результаті взаємодії з іонами в решітку напівпровідника вносяться радіаційні пошкодження, які при наступних операціях можуть спотворювати профілі розподілу домішки. Дефекти сприяють також збільшенню струмів витоку і зміни інших характеристик приладів. Усунення дефектів вимагає високотемпературної обробки (відпалу).[22]

1. В якості вихідної заготовки використовують пластину монокристалічного кремнію, рівномірно леговану акцепторною домішкою (діркова електропровідність). Після того як на заготовку нанесено шар оксиду кремнію  $SiO_2$ , (рис.6.1) в цьому шарі з використанням фотолітографії вибірково витравлюють ділянки прямокутної форми, далі шляхом термічної дифузії вводять атоми домішки-донора. Процес дифузії поєднують з термічним окисленням кремнію, в результаті якого на поверхні знову утворюється суцільний шар  $SiO_2$ .

Розмір вихідного двохмірного моделюваного перерізу складає 90 мкм по горизонталі (вісь X) та 15 мкм по вертикалі (вісь Y).

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 78   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

Grid(x=(0.0, 90.0) y=(-15.0, 0.0), nx=240, ny=40)

Рівень легування підкладки Бором –  $4,08 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  з орієнтацією підкладки  $\langle 100 \rangle$ . В кінці утворення епітаксійного шару наносимо на поверхню захистний шар окислу  $\text{SiO}_2$  товщиною 50 нм.

Substrate(Element=B, Ysubs=0, conc=4.08e14, Orientation=100)

Deposit(material=Oxide, thickness=50nm)

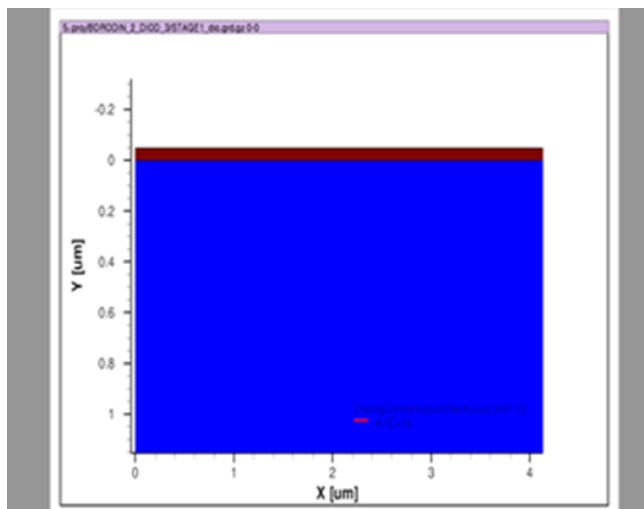


Рис. 6.1. Сформована підкладка. Зверху нанесений захисний окисел  $\text{SiO}_2$ .

2. Наступний крок в технології виробництва це створення n-шару фотодіода. На даному етапі використовується фотошаблон у вигляді нанесеної захисної резистивної маски товщиною 2950 нм (рис 6.2), за допомогою якої виділяють області під іонну імплантацію фосфору при формуванні n-карману.

Mask(material=resist, thickness=2950nm, x( -15.0 11.3 83.38 100.0 ))

Імплантація іонів з високою енергією, яка використовується для створення карманів, проходить через спеціально осаджений захисний шар окислу.

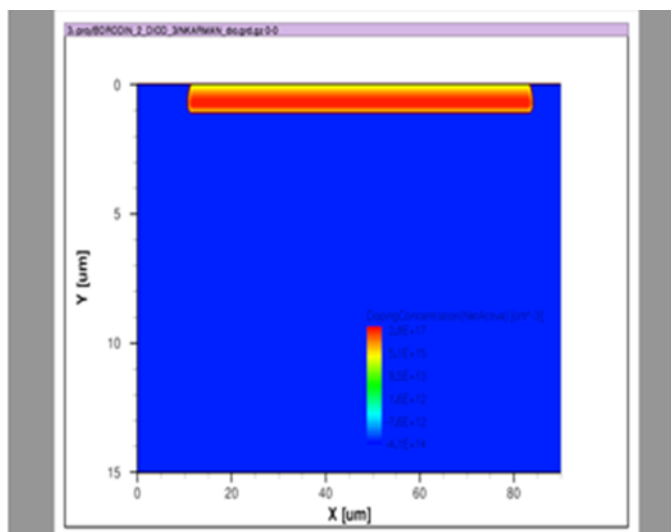


Рис. 6.2. Сформований n-шар фотодіода.

Енергія легування, при імплантації в кремній фосфору (величина домішки  $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ), складає 600 кеВ. Кут нахилу імплантаційного пучка, взятий від нормалі до поверхні пласти складає 7 градусів. При цьому система координат  $OX_W Y_W Z_W$  для імплантації домішки, зв'язана з пластиною, задається відповідно до рис. 6.3. Кут повороту пластини складає 0 та 180 градусів.

`impl(element=P, dose=5e12, energy=600keV, rotation=0, tilt=7)`

`impl(element=P, dose=5e12, energy=600keV, rotation=180, tilt=7)`

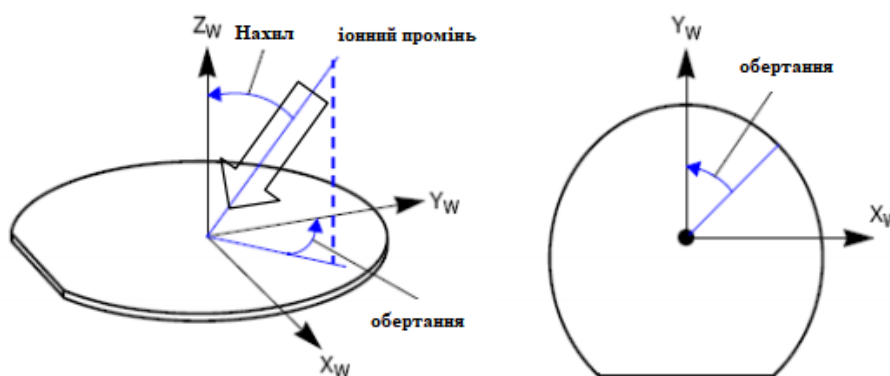


Рис. 6.3. Визначення напрямку іонного пучка в системі координат  $OX_W Y_W Z_W$ .

Таким чином, напрямок імплантанційного пучка визначається двома параметрами: tilt – кут нахилу ІП в площині ( $Z_W O Y_W$ ) відносно осі  $Z_W$ ; rotation – кут повороту пластини відносно початкового положення базової системи координат проти часової стрілки. Описание параметров ионного легирования.

Високотемпературна термічна обробка триває 0.25 с, при температурі 1100 С, та в середовищі газу – азот ( $N_2$ ). Після закінчення імплантації видаляємо захисну маску.

`Diffusion(time=0.25, Temperature=1100., Atmosphere=N2)`

3. Наступний крок створення р+ карману для контактних областей. Основні технологічні особливості описані в попередньому процесі, зауважимо тільки основні відмінності.

Використовується фотошаблон у вигляді нанесеної захисної резистивної маски товщиною 2950 нм, за допомогою якої виділяють області під іонну імплантацію бору при формуванні р-карману. Маска закриває створений в минулому процесі n-карман рис 6.4.



Mask(material=resist, thickness=2950nm, x( -15.0 0 9.18 100.0 ))

Енергія легування, при імплантації в кремній бору (величина домішки  $5 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>), складає 400 кеВ. Кут нахилу імплантаційного пучка, взятий від нормалі до поверхні пласти складає 7 градусів. Кут повороту пластини складає 0 та 180 градусів.

impl(element=BORON, dose=5e12, energy=400keV, rotation=0, tilt=7)

impl(element=BORON, dose=5e12, energy=400keV, rotation=180, tilt=7)

Високотемпературна термічна обробка триває 0.25 с, при температурі 1100 С, та в середовищі газу – азот (N<sub>2</sub>). Після закінчення імплентації видаляємо захисну маску.

Diffusion(time=0.25, Temperature=1100., Atmosphere=N2)

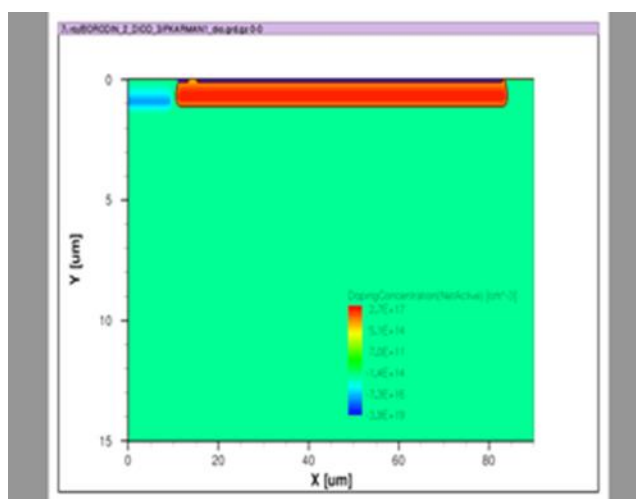


Рис. Сформовані р+-шар фотодіода і р-карман.

4. Наступний крок створення р+ шару фотодіода. Основні технологічні особливості описані в попередньому процесі, зауважимо тільки основні відмінності.

Використовується фотошаблон у вигляді нанесеної захисної резистивної маски товщиною 2950 нм, за допомогою якої виділяють області під іонну імплантацію фториду бора при формуванні р-карману.

Mask(material=resist, thickness=2950nm, x( -15.0 10.8 13.26 15.36 82.88 100.0 ))

Енергія легування, при імплантації в кремній фториду бора (величина домішки  $9,375 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>), складає 30 кеВ. Кут нахилу імплантаційного пучка, взятий від нормалі до поверхні пласти складає 7 градусів. Кут повороту пластини складає 0 та 180 градусів.

impl(element=BF2, dose=9.375e15, energy=30keV, rotation=0, tilt=7)

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 81   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

impl(element=BF<sub>2</sub>, dose=9.375e15, energy=30keV, rotation=180, tilt=7)

BF<sub>2</sub> – молекула фториду бору.

Високотемпературна термічна обробка триває 0.1 с, при температурі 1100 С, та в середовищі газу – азот (N<sub>2</sub>). Після закінчення імплентації видаляємо захисну маску.

Diffusion(time=0.1, Temperature=1100., Atmosphere=N<sub>2</sub>.

#### 5. Кінцевий процес – створення контактних областей.

В перших зразках інтегральних схем з'єднання між компонентами здійснювалися за допомогою тонких провідників, які приєднуються до контактних площадок методом термокомпресії, але такі з'єднання були дорогими і нетехнологічними.

Після появи планарної структури інтегральних мікросхем з'єднання стали виконувати за допомогою тонких металічних плівок, які нанесені на ізолюючий шар SiO<sub>2</sub>.

Для здійснення комутації і інтегральних схемах можна використовувати наступні матеріали: Au, Ni, Pb, Ag, Cr, Al, Ti-Au, Mo-Au, Ti-Pt-Au.[23]

До систем металізації інтегральних схем пред'являються наступні вимоги:

- висока провідність ( $\rho < 10^{-6}$  Ом·см);
- добра адгезія для Si та SiO<sub>2</sub>;
- можливість до утворення якісного омичного контакту з кремнієм *n*- та *p*-типів;
- відсутність шкідливих інтерметалічних з'єднань або реакцій, які руйнують кремній в процесі обробки та експлуатації системи;
- технологічність методів осадження і нанесення рисунків;
- стійкість до електродифузії в металі;
- металургічна сумісність із сплавами, які використовуються для приєднування зовнішніх провідників до металізованої схеми.

Найбільш зручним, простим у виготовленні і дешевим матеріалом для металізації інтегральних мікросхем є алюміній, який зазвичай наносид методом випаровування в вакуумі.[23]

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 82   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

Використовується фотошаблон у вигляді нанесеної захисної резистивної маски товщиною 2950 нм, за допомогою якої виділяють області під іонну імплантацію бору при формуванні р-карману. Маска закриває створений в минулому процесі n-карман рис 6.4.

Mask(material=resist, thickness=2950nm, x( -10 0 0.42 0.96 2.88 3.48 4.68 5.38 6.58 7.18 8.28 13.83 14.79 100 ))

Енергія легування, при імплантації в кремній миш'яку (величина домішки  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ), складає 100 кеВ. Кут нахилу імплантаційного пучка, взятий від нормалі до поверхні пласти складає 7 градусів. Кут повороту пластини складає 0 та 180 градусів.

Impl(element=As, dose=1e15, energy=100keV, rotation=0, tilt=7)

Impl(element=As, dose=1e15, energy=100keV, rotation=180, tilt=7)

Високотемпературна термічна обробка триває 0.25 с, при температурі 1100 С, та в середовищі газу – азот ( $\text{N}_2$ ). Після закінчення імплентації видаляємо захисну маску.

Diffusion(time=0.25, Temperature=1100., Atmosphere=N2)

## ВИСНОВКИ

Основними структурними операціями технології виготовлення моделі КМОН-ФД комірки матриці: створення підкладки з заданою концентрацією домішки; створення n-області фотодіода; створення р+ карману для контактних областей; створення р+ шару фотодіода та створення контактних областей. В якості заготовки використовують пластину монокристалічного кремнію, яка рівномірно легована акцепторною домішкою (Бор), в якості контактних площадок - алюміній. Під час виготовлення комірки використовували методи іонного легування.

## ГЛАВА 7. ЗАВСТОСУВАННЯ КМОН-ФД МАТРИЦЬ КМОН-ФД матриці для прийому оптичного зображення

Твердотільні фотоприймачі за останніх 15–20 років все швидше еволюціонують від ПЗЗ-схеми, яка обмежена для широкого використання до технології КМОН-фотоприймачів[24]. Якщо в ПЗЗ-схемі комутуються пакети зарядів у тілі кристалу і перетворюються в напругу тільки на вихідному пристрої, то в фоточутливих КМОН-схемах з активною коміркою перетворення зарядку в напругу відбувається в кожній комірці фотоматриці (фактично немає переносу

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 83   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

заряду), і на виході комутуються по металізованим шинам вже в напругу. Управління опитуванням масиву пікселів від вбудованого цифрового блоку забезпечують гнучкість і багатофункціональність процесу виведення інформації, адаптацію його під конкретну задачу. Якщо в схему вбудований аналого-цифровий перетворювач (як правило, стовбця), то можлива цифрова обробка зображення. Однак для таких приладів потрібні багатовиводні (100 і більше виводів) корпусу, а для розміщення АЦП в стовпчиках доводиться використовувати технологію з нормами проектування не більше 0,18 мкм з 6 шарами металізації [24].

У той же час фоточутливі комірки розміром більше 9 – 10 мкм можуть бути реалізовані по КМОН-технологій рівня 0,35-0,6 мкм з 3-4 шарами металізації, що робить такі розробки більш економічно доступними. Крім того, розрядність зовнішнього АЦП не обмежується характерними для стовбцевих АЦП 10-12 бітами, а зменшення потужності розсіювання в кристалі сприяє поліпшенню фотоелектричних параметрів приладу. Тому розумно створення матричного КМОП-фотоприймача з аналоговим виходом і коміркою великого розміру. Хоча така мікросхема не настільки зручна для масового використання, проте ряд параметрів, наприклад, досить велика зарядова ємність комірки і чутливість, можуть забезпечити їй свою область застосування. [24]

Прилад складається із кристалу мікросхеми розміром 18,2x15,4 мм, встановленого на керамічну основу, яке закрито вхідним оптичним вікном (виробництво ОАО «ЗПП» м.Йошкар-Ола). Із 64 основних виводів використовується не більше 37, із яких, в залежності від режиму роботи мікросхеми, назначені від 1 до 16 аналогових виходів відеосигналу і від 2 до 16 виводів регульованої напруги, які дозволяють оптимізувати роботу мікросхеми. Розмір фоточутливої області складає 16,64x13,31 мм, діагональ 21,3 мм (4/3 дюймів). На рис. 7.1 представлена функціональна схема пристрою, а також – фотографія самого пристрою.

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 84   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

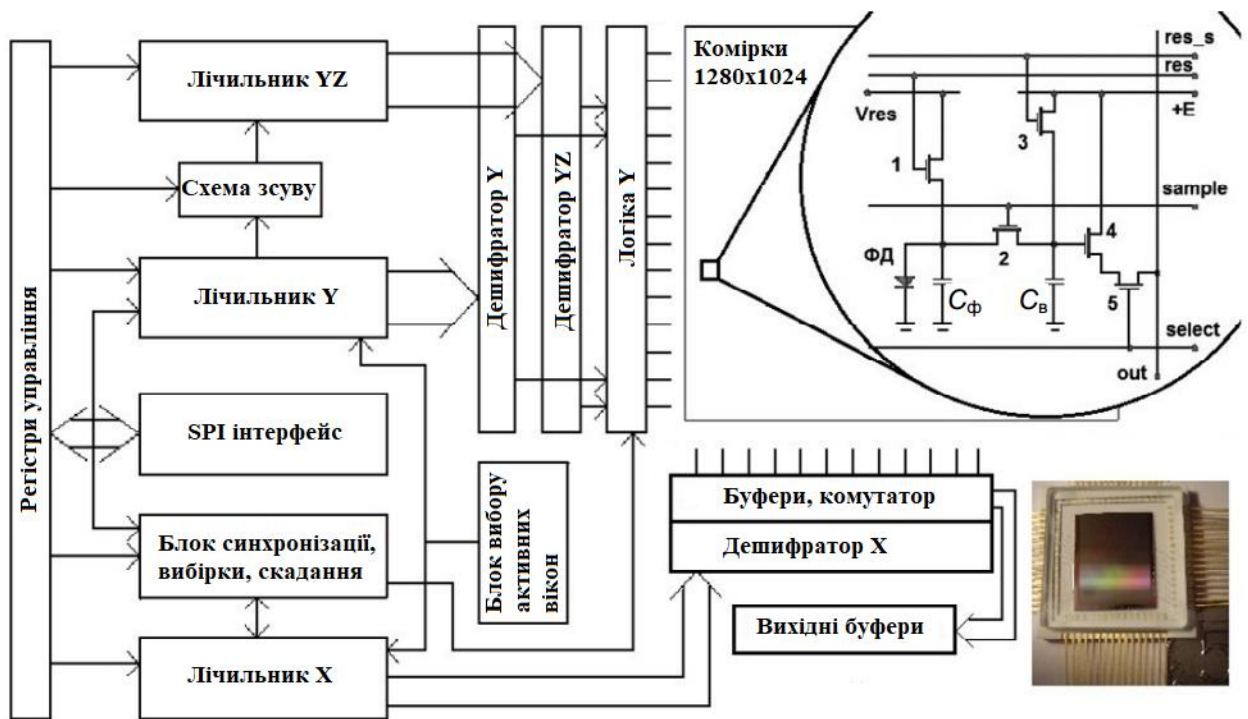


Рис. 7.1. Функціональна схема матричного КМОН-матриці і його фотографія.

Схема управління масивом фотокомірок (пікселів), яка раніше використовувалася в КМОН-фотоприймачі формату 1024x1024 комірок розміром 15x15 мкм[10], була суттєво перероблена і доповнена, так як і тракт виводу відеосигналу, що дозволило значно збільшити швидкодію та чутливість.[25]

Функціональна схема складається із лічильника X, дешифратора X, лічильників Y і YZ, схеми зсуву запуску лічильника YZ, двох дешифраторів Y і YZ, інтерфейс SPI з регістрами управління, блоку вибірки активних вікон і блоку синхронізації, в якому виробляються імпульси вибірки і скидання, перемикання опитування рядків і початку виводу відеосигналу. Схема забезпечує роботу КМОН-матриці:

- в конвеєрному режимі із завданням часом інтегрування з кратністю часу виведення одного рядка;
- в режимі миттєва фотографія з виходом після або під час інтегрування, або після інтегрування кожного активного «вікна інтересу» (до 4 прямокутних вікон з довільними розмірами і положеннями, кратними 16 коміркам);
- неруйнівне зчитування (вихід до 15 кадрів в процесі інтегрування без між кадрового скидання).

Можливий переверт зображення по X/Y, ДКВ (подвійна кореляційна вибірка) , прогресивна або черезрядкова розгортка з виводом інформації паралельно на 1, 2, 4, 8 або 16 виходів. Налаштування часу інтегрування при миттєвій фотографії можливо не тільки тривалістю зовнішнього імпульсу, але і цифровим кодом в інтервалі від 10 періодів до 2 мільйонів періодів тактової частоти. Управління всіма режимами виконується через SPI-порт.

Мікросхема виготовлені за стандартною КМОН-технологією з нормами проектування 0,5 мкм, один шар полікремнію та трьома шарами металізації.

На рис. 7.2 приведено зображення телевізійної таблиці, отриманої після реєстрації кадру платою АЦП, який підключений безпосередньо до виходу мікросхеми, і подальша побудова зображення в програмі MathCad (конвеєрний режим, «1 вихід», тактова частота 10 МГц). Формат зображення 1280x1024 комірок, частота кадрів 7,5 Гц.

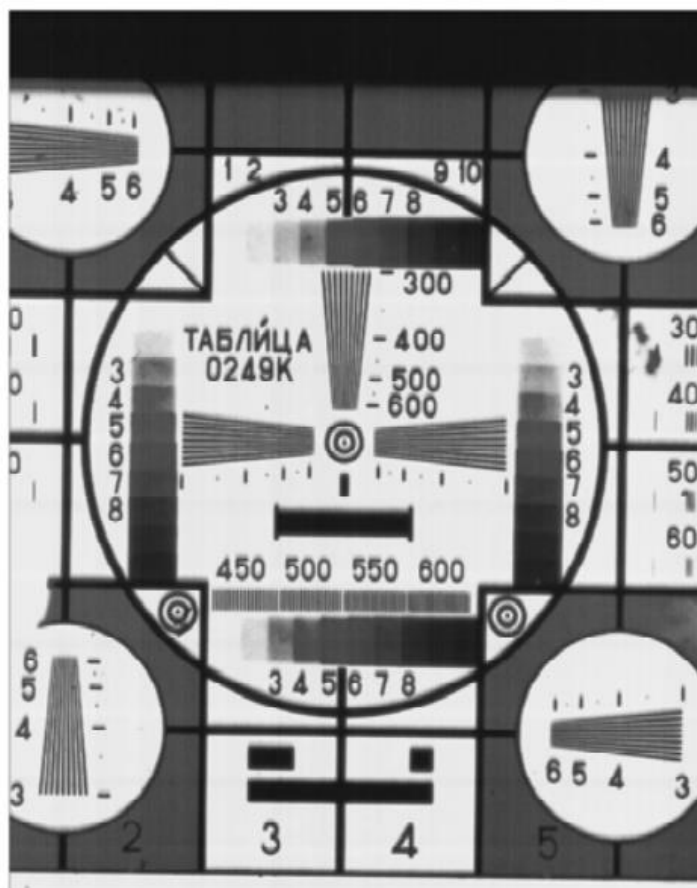


Рис. 7.2. Зображення телевізійної таблиці.

В таблиці 7.1 наведені основні параметри КМОН-фотоприймача оптичного зображення, який переважає своїх аналогів по чутливості та потужності розсіювання.

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 86   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

Таблиця 7.1

Основні параметри матричного КМОН-фотоприймача

| Параметр, одиниця вимірювання                              | Значення       |
|--|----------------|
| Формат фоточутливої області, рядків × стовбець             | 1280×1024      |
| Розмір комірки, мкм×мкм                                    | 13×13          |
| Спектральний діапазон, мкм                                 | 0,4-1,0        |
| Напруга насичення вихідного сигналу, В, не менше           | 1,0            |
| Інтегральна чутливість, В(лк×с)                            | Від 25 до 1000 |
| Частота кадрів формату 1280×1024, Гц                       |                |
| 16 виводів   | 600            |
| 4 вивода   | 80             |
| 1 вивід  | 15             |
| Потужність розсіювання, мВт, при частоті виводу інформації |                |
| 10 МГц   | 65             |
| 15 МГц   | 75             |
| 20 МГц   | 85             |

Матрична КМОН-схема забезпечує широкий динамічний діапазон, як за рахунок великої максимальної зарядової ємності (для високої освітленості), так і завдяки великій чутливості (для низької освітленості), також дозволяє регулювати час експозиції на 5 порядків, від долі мікросекунд до часу виводу кадру. Фотоприймач використовують в відеосистемах, які працюють в розширеному діапазоні освітленостей, а також може бути використаний для реєстрації швидких процесів.

#### КМОН-ФД матриці в космічному телебаченні

Перспективним напрямком в КМОН-ФД матрицях є інтеграція аналого-цифрового перетворювача безпосередньо в піксель. Реалізація покоління КМОН фотоприймачів - з цифровим пікселем [36], [246].

Проблема чутливості цих фотоприймачів пов'язана з тим, що площа фотодіода складає лише малу частину площі пікселя. Вона вирішується час технологіями нанесення мікролінз або зворотного засвічення. Ключовим моментом використання вбудованого в піксель компаратора є можливість радикального збільшення динамічного діапазону. При класичному аналоговому накопиченні в пікселі динамічний діапазон визначається ємністю пікселя і не перевищує декількох сотень. Так як реальні сюжети мають істотно більший діапазон зміни освітленості (як в кадрі, так і, особливо, протягом сеансу спостереження), то в телекамери використовується режим АРЧН (автоматичне регулювання часу

накопичення), який скорочує час накопичення при надлишку освітленості. В результаті більшість фотонів перетворюються не в інформацію, а в тепло. І тільки технологія цифрового пікселя великої розрядності дозволяє перетворювати все фотоелектрони в інформацію.

Ідея групового рахунку в матрицях зі змішаним аналого-цифровим накопиченням конкретизується з урахуванням концепції максимізації якості інформації [36]: існує оптимальний розмір накопичуваної групи фотогенерованих електронів, при типових значеннях шуму зчитування перевищує його приблизно в п'ять разів, і практично для всіх сюжетів космічного телебачення достатнім є 24 розряду (3 байти/піксель) [36]. Використання змішаного аналого-цифрового накопичення навіть при досить невеликій ємності фотодіода (вираженої в числі електронів) дозволить багаторазово підняти контрастну чутливість КМОН фотоприймача, впритул підійшовши до межі, обмеженому фотонної структурою світла, і далеко перейшовши за межу, обумовлений ємністю пікселя.

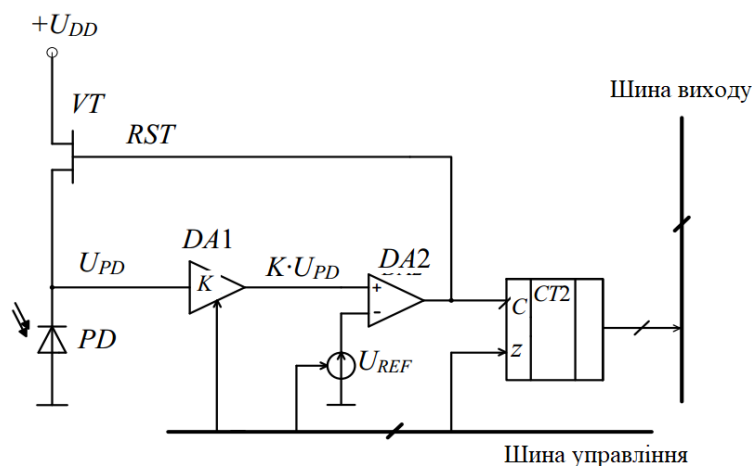


Рис. 7.1. Цифровий піксель з перетворенням сигнал-частота і регульованим розміром групи фотогенерованих електронів (регульований коефіцієнт підсилення)

Концепція змішаного аналого-цифрового накопичення якості інформації у силі універсальної КМОН технологій (на відмінну від технологій ПЗЗ) застосовується не лише до матричних фотоприймачів, але і до приборів з часовою затримкою і накопиченням (ЧЗН)(рис.7.1).

## ВИСНОВОК

КМОН-ФД матриці мають широке застосування побутовій апаратурі (цифрові камери і фотоапарати, відеотелефони, системи безпеки та системах спостереження), в промислових, космічних і оборонних системах (астронавігації,

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 88   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |



астроорієнтації, технічному зору). Створення інтелектуальних камер, які будуть на основі КМОН-ФД однокристальних цифрових камерах, разом на кристалі із пристроями цифрової, аналогової і нейроподібної обробки зображення. За допомогою інтелектуальних камер можливо в майбутньому реалізувати системи технічного та штучного зору, який буде однаковий із характеристиками людського зору.

## ГЛАВА 8. СТАРТАП-ПРОЕКТ

### Опис ідеї проекту

Проведений маркетинговий аналіз технології та КМОН-ФД матриць, які описані в магістерській дипломній роботі. Визначено його принципову можливість для ринкового впровадження та напрямки реалізації, основні вигоди, які може отримати користувач, основні напрямки застосування(табл.8.1).

Сфера застосування КМОН-ФД та різних технологій виготовлення зовсім не нова на світовому ринку, тому зупинимось на розгляді основних інновацій для даної магістерської роботи.

Таблиця 8.1

Опис ідеї стартап-проекту

| Зміст ідеї  | Напрямки застосування  | Вигоди для користувача   |
|---|--|--|
| Створення двомірної моделі фотоприймальної комірки КМОН-ФД в середовищі приладово-технологічного моделювання Sentaurus TCAD (Synopsys) для промислового моделювання | Компанії виробники ПЗЗ та КМОН-фоточутливих матриць                        | Дана модель, на відміну від 3D моделі, дозволяє скоротити часові затрати до рівня, який достатній для реального проектування на виробництві. |
|   | Застосування КМОН-ФД комірки змодельованою за розробленою двомірною моделю | Дешевизна виготовлення та поширеність у світі, широкий спектр використання(побутова апаратура, відеотелефони, цифрові камери та              |

|  |  |   |
|--|--|---|
|  |  | фотоапарати), промислові, космічні і військові системи. |
|--|--|---|

### Технологічний аудит ідеї проекту

Визначено технологію та додаткове програмне забезпечення за допомогою якого можна реалізувати ідею проекту. Обрана технологія реалізації ідеї проекту: реалізація за допомогою програмного забезпечення Sentaurus TCAD (Synopsys), оскільки програма була доступною, для проведення моделювання, а виробництво було б не доцільним, адже була змодельована тільки комірка КМОН-ФД матриці(табл.8.2).

Таблиця 8.2

#### Технологічна здійсненність проекту

| № | Ідея проекту  | Технологія її реалізації                         | Наявність технологій   | Доступність технологій   |
|---|---|--|--|--|
| 1 | Розробка моделі двомірної КМОН-ФД комірки для використання при проектуванні, дослідженнях і виробництві в Sentaurus TCAD (Synopsys) | Реалізація за допомогою програмного забезпечення | Існує достатня кількість програмного забезпечення, які здатні проводити аналогічне моделювання моделей | Усе програмне забезпечення доступне в інтернеті і підтримуються виробниками даних програм, за користування та доступ до усіх бібліотек і можливостей програми потрібно купити відповідну програму. |
| 2 |   | Реалізація за допомогою технології               | Можуть виготовляти фірми, які  | Усі потрібні технології виробництва доступні для даних фірм  |

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 90   |

|  |  |              |  |             |
|--|--|--------------|--|-------------|
|  |  | виготовлення | займаються<br>технологією<br>виробництва<br>КМОН<br>мікроелектроніки | виробників. |
|--|--|--------------|--|-------------|

## ВИСНОВКИ

Аналізуючи ринкові можливості запуску даного стартап-проекту, в розробки, яка описана в магістерській дипломній роботі, є усі можливості до ринкової комерціалізації, особливо у наукових, дослідницьких та виробничих сферах КМОН технології мікроелектроніки. Із-за скорочення часових затрат при програмних розрахунках та легкому і зрозумілому доступі до програмного коду моделі, можна швидко змінювати структури фотоприймальної комірки КМОН-ФД та її технологію виготовлення.

## ВИСНОВОК

В ході дослідження було виділено два основних типи фотоприймальних матриць: ПЗЗ-матриці і комплементарні структури метал-оксид-напівпровідник – матриці (КМОН-матриці).

Основні переваги КМОН-матриць над ПЗЗ-матрицями:

- можливість піксельно задавати розміри і положення фрагменту зображення;
- нова технологія формування кольорового зображення Foveon, яка забезпечує 100 відсоткове використання світлового потоку;
- реалізації різноманітних алгоритмів зчитування, що спрощує операцію збільшення зони накопичення.

На даний час ведуться розробки КМОН-матриць з активними пікселями. Нові розробки КМОН-матриць направлені на покращення основних параметрів: динамічний діапазон, експлуатаційні параметри, характеристики, зменшення шумів.

Підсумовуючи КМОН-ФД матриці на відміну від фотоприймачів попереднього покоління на ПЗЗ, можуть забезпечити широкий лінійний динамічний діапазон, можливість реалізація високої частоти опитування зарядових пакетів.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>МРП 171.081.017 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 91   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Розглянуто методи утворення кольорового зображення в ПЗЗ-матрицях використовують масиви фільтрів колірної моделі Баєра (RGB-модель). Варіаціями фільтра Баєра є фільтри: RGBE-, RGBW-, CYGM- та CYUM-фільтри.

В обох типах матриць ПЗЗ- та КМОН- використовують технологію кольорового зображення з використанням Foveon X3. Технологія повноколірної RGB матриці для КМОН має перевагу в ефективності використання світлового потоку, 1.5-кратне порівняно з елементами фотосенсорів RGBW.

Розглянуто такі параметри КМОН-ФД-датчиків: абсолютний показник якості, спектральний діапазон, квантова ефективність, просторова роздільна здатність, глибина кольору, динамічний діапазон, чутливість, темновий струм, ефективність перетворення заряду в напругу. Частотно-контрастна характеристика показує, як знижується контраст у найдрібніших деталях зображення. Оптичний формат матриці вимірюється в дюймах або міліметрах.

В результаті моделювання була розроблена двовимірною моделлю, що дає можливість оперативного внесення змін в об'ємну структуру осередку і володіє можливістю обліку її реальної топології) та проведені розрахунки світло-сигнальної характеристики.

Основними структурними операціями технології виготовлення моделі КМОН-ФД комірки матриці: створення підкладки з заданою концентрацією домішки; створення n-області фотодіода; створення р+ карману для контактних областей; створення р+ шару фотодіода та створення контактних областей. Під час виготовлення комірки використовували методи іонного легування.

Аналізуючи ринкові можливості запуску даного стартап-проекту, в розробки, яка описана в магістерській дипломній роботі, є усі можливості до ринкової комерціалізації, особливо у наукових, дослідницьких та виробничих сферах КМОН технології мікроелектроніки.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Magnan P. Detection of visible photons in CCD and CMOS: a comparative view / P. Magnan // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2003. – Vol. A504. – P.199-212

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 92   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

2. Вишневский Г.И., Коссов В.Г. Разработки и производство ФПЗС и цифровых камер на их основе // Научно-технический журнал «ТелефотоТехника». -2008.
3. Г.Н. Грязин. Основы и системы прикладного телевидения. – СПб.: Политехника. 2011. – 274 с.
4. Вишневский Г.И., Коссов В.Г. Разработки и производство ФПЗС и цифровых камер на их основе // Научно-технический журнал «ТелефотоТехника». -2008.
5. Носов Ю.Р., Шилин В.А. Основы физики приборов с зарядовой связью. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – (Физика полупроводников и полупроводниковых приборов). – 320 с.
6. Шилин В.А. – Микроэлектроника, 1985, т.8, №1, с.29.
7. Пресс Ф.П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.: ил.
8. Nauchnye CCD camery Falcon kompanyi Raptor Photonics [Scientific CCD cameras Falcon company Raptor Photonics]. Raptor Photonics, 2016. Access link: [www.raptorphotonics.ru](http://www.raptorphotonics.ru) (accessed 03 June 2016).
9. Барб Д.Ф., Кэмпана С. Изображающие приборы с зарядовой связью // Достижения в технике воспроизведения изображений. - М.:Мир, 1980. - Т. 3. - С. 180-305
10. Claus G., et al, Particle Tracking using CMOS Monolithic Active Pixel Sensor, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2001, V. A 465, pp.120-124
11. Hogan HH.. Imaging is Everything.– Photonics Spectra, 1998, p.82–84.
12. Agvany SS., DDomer SS., RRubacha RR., SStanley SS.. High Performance, VGA Resolution Digital Color CMOS Imager.– IS&T/SPIE Conference on Sensors, Cameras and Systems. – Proc. of SPIE, v.3649, p.154–164.
13. Манцветов А. А., Цыцулин А. К. Телекамеры на КПОП фотоприём-никах. Вопросы радиоэлектроники, сер. Техника телевидения, 2006, вып. 2, с. 70–89.
14. Novel CMOS image sensor with a 132-dB dynamic range / D. Stoppa, A. Simoni, L. Gonzo M. Gottardi // IEEE journal of solid-state circuits, vol. 37, N 12, dec 2002, pp. 1846–1852
15. Передовая технология компанииPixim//«CCTV Фокус», №4, 2003, с. 12–15.
16. Чадюк В.О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання : навч. посіб. /В.О. Чадюк. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. – Кн.1. – 376 с.
17. MPP mode [Electron. resource]. – Access link: <http://www.photometric.com/resources/learningzone/mppmode.php>

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 93   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

18. Шилин В.А. Основные схемотехнические проблемы и перспективы проборов с зарядовой связью. – Микроэлектроника, 1979, т.9, №6, с. 3.

19. Стемповский А.Л., Шилин В.А. КМОП-фотодиодные СБИС-перспективная элементная база однокристалльных систем приема и обработки изображений // М.: Электроника: НТБ. 2003. С. 16-24.

20. Simon Li, Fred Y. Fu, Lisa Li, Kentaro U. Practical new approach to 3D TCAD simulation // URL: <http://www.crosslight.com> (дата обращения: 20.05.2015)

21. Пугачев А.А. Математическое моделирование элементов фоточувствительных СБИС // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2005. Сборник трудов / Под общ. ред. академика РАН А.Л.Стемповского. М.: ИППМ РАН, 2005. С. 165-172. Phanindra K. Device modeling and advanced 2-D TCAD simulation of multifinger photogate APS forenhanced sencitivity // Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of master of applied science. Phanindra Kalyanam, 2011 Simon Fraser University, 2011.

22. Королев М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем [Электронный ресурс] : в 2ч. Ч.1 / М.А.Королев, Т.Ю.Крупинка, М.А.Ревелева; под общей ред. Чл.-корр. РАН проф. Ю.А.Чаплыгина. – 2-е изд. (эл.).- М.:БИНОМ.Лаборатория знаний, 2012. – 397 с.: ил.

23. Технология интегральной электроники: учебное пособие по дисциплине «Конструирование и технология изделий интегральной электроники» для студентов специальностей “Проектирование и производство РЭС”, ”Электронно-оптические системы и технологии” / Л.П. Ануфриев, С.В. Бордусов, Л.И. Гурский [и др.]; / Под общ. ред. А.П. Достанко и Л.И. Гурского. – Минск: «Интегралполиграф», 2009. – с.: ил.

24. Твердотельная революция в телевидении: Телевизионные системы на основе приборов с зарядовой связью, систем на кристалле и видеосистем на кристалле/ В. В. Березин, А. А. Умбиталиев, Ш. С. Фахми, А. К. Цыцулин, Н. Н. Шипилов; Под ред. А. А. Умбиталиева и А. К. Цыцулина. – М.: Радио и связь, 2006. – 312 с., ил. – ISBN 5-256-01814-0

25. Теория и практика космического телевидения. Под ред. А. А. Умбиталиева, А. К. Цыцулина. СПб.: НИИ телевидения, 2017. 368 с., ил.

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 94   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

## ДОДАТОК А

Командний файл для програми технологічного моделювання DIOS для моделі №2

```
Title('WAS',newdif=1)
```

```
Grid(x=(0.0, 95.0) y=(-15.0, 0.0), nx=200, ny=40)
```

```
repl(cont(maxtrl=5,markm=-6,markmax=0,markj=-6,markg=-6))
```

```
Diffusion:(PO(
```

```
P(MODDiff=Suprem-2),
```

```
B(MODDiff=Suprem-2)
```

```
))
```

```
! start the graphical output, set to update every 10 time steps:
```

```
Replace(Control(ngra=10))
```

```
Graphic(triangle=on, plot)
```

```
! ***** Substrate define *****
```

```
Substrate(Element=B, Ysubs=0, conc=6.8e14, Orientation=100)
```

```
Deposit(material=Oxide, thickness=50nm)
```

```
Save(file=STAGE1, type=mdraw)
```

```
Save(file=STAGE1, type=dmp)
```

```
End
```

```
! start the graphical output, set to update every 10 time steps:
```

```
Replace(Control(ngra=10))
```

```
Graphic(triangle=on, plot)
```

```
Load(file=STAGE1.dmp)
```

```
Mask(material=resist, thickness=2950nm, x( -15.0 16 27 100.0 ))
```

```
impl(element=BORON, dose=4e12, energy=250keV, tilt=7)
```

```
Etch(mat=re)
```

```
Diffusion(time=1, Temperature=1100., Atmosphere=N2)
```

```
Save(file=P_KARMAN, type=mdraw)
```

```
Save(file=P_KARMAN, type=dmp)
```

```
Mask(material=resist, thickness=2950nm, x( -15.0 17 19 20 22 23 25 29 31 100.0 ))
```

```
impl(element=As, dose=1.3e14, energy=250keV, tilt=7)
```

```
Impl(element=As, dose=1.3e14, energy=250keV, rotation=180,tilt=7)
```

```
Etch(mat=re)
```

```
Diffusion(time=25, Temperature=850., Atmosphere=N2)
```

```
Diffusion(time=15, Temperature=850., Atmosphere=N2)
```

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПІ 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 95   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

```

Diffusion(time=35, Temperature=(850., 1000.), Atmosphere=N2)
Diffusion(time=20, Temperature=1000., Atmosphere=N2)
Diffusion(time=50, Temperature=(1000., 800.), Atmosphere=N2)
Diffusion(time=25, Temperature=800., Atmosphere=N2)
Save(file=NPLUS, type=mdraw)
Save(file=NPLUS, type=dmp)
End

! start the graphical output, set to update every 10 time steps:
Replace(Control(ngra=1))
Graphic(triangle=on, plot)
Load(file=NPLUS.dmp)
Mask(material=resist, thickness=950nm, x(10.0 84.0))
Implant(element=B, dose=6.3e14, energy=80keV, tilt=7)
Etch(mat=re)
Diffusion(time=40, Temperature=1000., Atmosphere=N2)
save(file=FINAL_BOR2CORRGATES_VERNO, type=mdraw,
EPSLoc=0, EPSAngle=0)
End

```



## ДОДАТОК Б

Командний файл для програми електрофізичного моделювання Sentaurus Device для моделі №2.

```
File {
Grid = "/BORODIN_DIOD_3_msh.tdr"
Plot = n@node@
Current = n@node@
}
Electrode {
{ Name="SUB" Voltage= @VSUB@
}
{ Name="KONT1" Voltage= ( @VES@ at 0.0
@VES@ at 180.0
@VES@ at 200.0
@VES@ at 1000.0 )
}
{ Name="KONT2" Voltage= (
@VES@ at 0.0
@VES@ at 180.0
@VES@ at 200.0
@VES@ at 1000.0
)
}
{ Name="T4" Voltage= (
@GA_VNAK@ at 0.0,
@GA_VNAK@ at 20.0e-9
@GA_VREAD@ at 40.e-9
@GA_VREAD@ at @TN1@
@GA_VNAK@ at @<TN1+20.0E-9>@
@GA_VNAK@ at @<TN1+80.0E-9>@
@GA_VREAD@ at @<TN1+100.0E-9>@
@GA_VREAD@ at @TSTOP@
)
}
```

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 97   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

```

{ Name="T1" Voltage= (
  @GA_VNAK@ at 0.0,
  @GA_VNAK@ at 60.0e-9
  @GA_VREAD@ at 80.0e-9
  @GA_VREAD@ at @TSTOP@
)
}

{ Name="T2" Voltage= (
  @GA_VNAK@ at 0.0,
  @GA_VNAK@ at 60.0e-9
  @GA_VREAD@ at 80.0e-9
  @GA_VREAD@ at @TSTOP@ )
}

Physics {
EffectiveIntrinsicDensity( OldSlotboom )
OptBeam (
WaveLength =0.535e-4
WavePower =@PB1@
SemAbs (model=ODB)
SemSurf = 0.05000e-4
SemWindow = (10.8e-4 81.74e-4)
WaveTime = (10.0E-9 1.00)
WaveTsigma = 0.5e-13
SemVelocity = 0
)
Recombination (
SRH( DopingDep )
)
Temperature=250.0
}

File {
Current = "str"
Output = "log"
}

```

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 98   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

```

Plot {
eDensity eCurrent eMobility
Potential
Doping
}
Math {
Extrapolate Derivatives RelErrControl
Digits=8 NotDamped=30 Iterations=40
RelErrControl Transient=BE NoCheckTransientError
Method = pardiso Number_of_Threads = 4
Number_of_Solver_Threads = 4 ComputeIonizationIntegral
}
Solve {
Poisson
Transient (
InitialTime=0 FinalTime=@TSTOP@
InitialStep=1e-16 MaxStep=1.0e-2 MinStep=1.0e-17
)
{ Coupled { Poisson Electron Hole }
Plot (
fileprefix="n@node@"
Time = (0;
@<TN1+100e-9>@
)
NoOverwrite)
}
}

```

## ДОДАТОК В

Командный файл для програми технологічного моделювання DIOS для модели №3

```
Title('BORODIN_DIOD_3',newdif=1)
```

```
Grid(x=(0.0, 90.0) y=(-15.0, 0.0), nx=240, ny=40)
```

```
repl(cont(maxtrl=5,markm=-6,markmax=0,markj=-6,markg=-6))
```

```
Diffusion:(PO(
```

```
P(MODDiff=Suprem-2),
```

```
B(MODDiff=Suprem-2)
```

```
))
```

```
! start steps:
```

```
Replace(Control(ngra=10))
```

```
Graphic(triangle=on, plot)
```

```
! ***** Substrate define *****
```

```
Substrate(Element=B, Ysubs=0, conc=4.08e14, Orientation=100)
```

```
Deposit(material=Oxide, thickness=50nm)
```

```
Save(file=STAGE1, type=mdraw)
```

```
Save(file=STAGE1, type=dmp)
```

```
end
```

```
! start the graphical output, set to update every 10 time steps:
```

```
Replace(Control(ngra=10))
```

```
Graphic(triangle=on, plot)
```

```
Load(file=STAGE1.dmp)
```

```
comment (' SOZDANIE_N_KARMANA')
```

```
Mask(material=resist, thickness=2950nm, x( -15.0 11.3 83.38 100.0 ))
```

```
impl(element=P, dose=5e12, energy=600keV, rotation=0, tilt=7)
```

```
impl(element=P, dose=5e12, energy=600keV, rotation=180, tilt=7)
```

```
comment (' REMOVE PhotoRezist MASK ')
```

```
Etch(mat=re)
```

```
Diffusion(time=0.25, Temperature=1100., Atmosphere=N2)
```

```
Save(file=NKARMAN, type=mdraw)
```

```
Save(file=NKARMAN, type=dmp)
```

```
End
```

```
! start the graphical output, set to update every 10 time steps:
```

```
Replace(Control(ngra=10))
```

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПІ 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 100  |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

```

Graphic(triangle=on, plot)
Load(file=NKARMAN.dmp)
comment (' SOZDANIE_P_KARMANA')
Mask(material=resist, thickness=2950nm, x( -15.0 0 9.18 100.0 ))
impl(element=BORON, dose=5e12, energy=400keV, rotation=0, tilt=7)
impl(element=BORON, dose=5e12, energy=400keV, rotation=180, tilt=7)
comment (' REMOVE PhotoRezist MASK ')
Etch(mat=re)
Diffusion(time=0.25, Temperature=1100., Atmosphere=N2)
Mask(material=resist, thickness=2950nm, x( -15.0 10.8 13.26 15.36 82.88 100.0 ))
impl(element=BF2, dose=9.375e15, energy=30keV, rotation=0, tilt=7)
impl(element=BF2, dose=9.375e15, energy=30keV, rotation=180, tilt=7)
comment (' REMOVE PhotoRezist MASK ')
Etch(mat=re)
Diffusion(time=0.1, Temperature=1100., Atmosphere=N2)
Save(file=PKARMAN1, type=mdraw)
Save(file=PKARMAN1, type=dmp)
End

! start the graphical output, set to update every 10 time steps:
Replace(Control(ngra=1))
Graphic(triangle=on, plot)
Load(file=PKARMAN.dmp)
Replace(Control(NewDiff=1, SiDiff=on))
comment (' PHOTO MASK 4 ')
Mask(material=resist, thickness=2950nm, x( -10 0 0.42 0.96 2.88 3.48 4.68 5.38 6.58
7.18 8.28 13.83 14.79 100 ))
comment (' Arsenicum IMPLANT ')
Impl(element=As, dose=1e15, energy=100keV, rotation=0, tilt=7)
Impl(element=As, dose=1e15, energy=100keV, rotation=180, tilt=7)
comment (' REMOVE PhotoRezist MASK ')
Etch(mat=re)
Diffusion(time=0.25, Temperature=1100., Atmosphere=N2)
Save(file=STRUCT_NPLUS, type=mdraw)
Save(file=STRUCT_NPLUS, type=dmp)
Save(file=STRUCT_NPLUS, type=dmp)

```

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПІ 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 101  |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

save(file=FINAL\_BOR2CORRGATES\_VERNO, type=mdraw,  
EPSLoc=0, EPSAngle=0)  
End

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 102  |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

## ДОДАТОК Г

Командный файл для програми електрофізичного моделювання Sentauros Device  
для моделі №3

```
File {  
  Grid = "./BORODIN_DIOD_3_msh.tdr"  
  Plot = n@node@  
  Current = n@node@  
}  
Electrode {  
  { Name="SUB" Voltage= @VSUB@  
  }  
  { Name="C_PU" charge=0 FGcap= (  
    value= @C_VIRT_PU@ name="SUB"  
  )  
  }  
  { Name="C_T4" charge=0 FGcap= (  
    value= @C_VIRT_T4@ name="SUB"  
  )  
  }  
  { Name="KONT1" Voltage= ( @VES@ at 0.0  
    @VES@ at 180.0  
    @VES@ at 200.0  
    @VES@ at 1000.0 )  
  }  
  { Name="KONT2" Voltage= (  
    @VES@ at 0.0  
    @VES@ at 180.0  
    @VES@ at 200.0  
    @VES@ at 1000.0  
  )  
  }  
  { Name="T4" Voltage= (  
    @GA_VNAK@ at 0.0,  
    @GA_VNAK@ at 20.0e-9  
    @GA_VREAD@ at 40.e-9
```

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 103  |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

```

@GA_VREAD@ at @TN1@
@GA_VNAK@ at @<TN1+20.0E-9>@
@GA_VNAK@ at @<TN1+80.0E-9>@
@GA_VREAD@ at @<TN1+100.0E-9>@
@GA_VREAD@ at @TSTOP@
)
}
{ Name="T1" Voltage= (
@GA_VNAK@ at 0.0,
@GA_VNAK@ at 60.0e-9
@GA_VREAD@ at 80.0e-9
@GA_VREAD@ at @TSTOP@
)
}
{ Name="T2" Voltage= (
@GA_VNAK@ at 0.0,
@GA_VNAK@ at 60.0e-9
@GA_VREAD@ at 80.0e-9
@GA_VREAD@ at @TSTOP@ )
)
}
Physics {
EffectiveIntrinsicDensity( OldSlotboom )
OptBeam (
WaveLength =0.535e-4
WavePower =@PB1@
SemAbs (model=ODB)
SemSurf = 0.05000e-4
SemWindow = (10.8e-4 81.74e-4)
WaveTime = (10.0E-9 1.00)
WaveTsigma = 0.5e-13
SemVelocuty = 0
)
Recombination (
SRH( DopingDep )

```

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 104  |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |



```

)
Temperature=250.0
}
File {
Current = "str"
Output = "log"
}
Plot {
eDensity eCurrent eMobility
Potential
Doping
}
Math {
Extrapolate Derivatives RelErrControl
Digits=8 NotDamped=30 Iterations=40
RelErrControl Transient=BE NoCheckTransientError
Method = pardiso Number_of_Threads = 4
Number_of_Solver_Threads = 4 ComputeIonizationIntegral
}
Solve {
Poisson
Transient (
InitialTime=0 FinalTime=@TSTOP@
InitialStep=1e-16 MaxStep=1.0e-2 MinStep=1.0e-17
)
{ Coupled {Poisson Electron Hole }
Plot (
fileprefix="n@node@"
Time = (0;
@<TN1+100e-9>@
)
NoOverwrite)
}
}

```

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | МПП 171.081.017 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 105  |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

## ДОДАТОК Д

Таблиці даних для світло-сигнальних характеристик, які побудовані для третьої моделі.

Таблиця 1

Значення потенціалу плаваючого вузла і фотодіода після закінчення стадії передачі заряду із фотодіода в плаваючий вузол для експериментів з різною потужністю світла.

| Потужність світла, [Вт/см <sup>2</sup> ] | Потенціал плаваючого вузла, [В] | Потенціал фотодіода, [В] |
|--|---------------------------------|--------------------------|
| 1,00E-12                                 | 4,43914                         | 4,69328                  |
| 5,00E-12                                 | 4,43908                         | 4,69322                  |
| 1,00E-11                                 | 4,43901                         | 4,69316                  |
| 5,00E-11                                 | 4,43847                         | 4,69265                  |
| 1,00E-10                                 | 4,43778                         | 4,69201                  |
| 5,00E-10                                 | 4,43232                         | 4,6869                   |
| 1,00E-09                                 | 4,42547                         | 4,68052                  |
| 5,00E-09                                 | 4,37065                         | 4,62957                  |
| 1,00E-08                                 | 4,30199                         | 4,56617                  |
| 5,00E-08                                 | 3,75118                         | 4,0681                   |
| 1,00E-07                                 | 3,05196                         | 3,45918                  |
| 1,25E-07                                 | 2,72237                         | 3,16747                  |
| 1,50E-07                                 | 2,5059                          | 2,97658                  |
| 1,75E-07                                 | 2,31677                         | 2,8074                   |
| 2,00E-07                                 | 2,18577                         | 2,68911                  |
| 2,25E-07                                 | 2,17247                         | 2,67705                  |
| 5,00E-07                                 | 2,14886                         | 2,65556                  |

Таблиця 2

Значення потенціалу плаваючого вузла і фотодіода після закінчення стадії передачі заряду із фотодіода в плаваючий вузол для експериментів з різною потужністю світла для підключеної до плаваючого вузла ємності  $1,5\text{e}^{-15}$  Ф.

| Потужність світла, [Вт/см <sup>2</sup> ] | Потенціал плаваючого вузла, [В] | Потенціал фотодіода, [В] |
|--|---------------------------------|--------------------------|
| 5,00E-12                                 | 4,78289                         | 4,73415                  |
| 5,00E-11                                 | 4,78241                         | 4,73369                  |
| 5,00E-10                                 | 4,77767                         | 4,72903                  |
| 1,00E-09                                 | 4,7724                          | 4,72386                  |
| 5,00E-09                                 | 4,73017                         | 4,68236                  |
| 1,00E-08                                 | 4,67737                         | 4,63049                  |
| 5,00E-08                                 | 4,25737                         | 4,22111                  |
| 1,00E-07                                 | 3,7372                          | 3,71816                  |
| 1,25E-07                                 | 3,47877                         | 3,47376                  |
| 1,50E-07                                 | 3,30932                         | 3,31527                  |
| 1,75E-07                                 | 3,15944                         | 3,17574                  |
| 2,00E-07                                 | 3,05465                         | 3,0778                   |
| 2,25E-07                                 | 3,04396                         | 3,06777                  |
| 2,50E-07                                 | 3,04088                         | 3,06488                  |
| 2,75E-07                                 | 3,03857                         | 3,0627                   |
| 3,00E-07                                 | 3,03656                         | 3,06082                  |
| 4,00E-07                                 | 3,03012                         | 3,05477                  |
| 5,00E-07                                 | 3,02533                         | 3,05027                  |
| 1,00E-06                                 | 2,98576                         | 3,01302                  |

Таблиця 3

Значення потенціалу плаваючого вузла і фотодіода після закінчення стадії передачі заряду із фотодіода в плаваючий вузол для експериментів з різною потужністю світла для підключення до плаваючого вузла ємності  $5,5e^{-16}$  Ф.

| Потужність світла, [Вт/см <sup>2</sup> ] | Потенціал плаваючого вузла, [В] | Потенціал фотодіода, [В] |
|--|---------------------------------|--------------------------|
| 5,00E-12                                 | 4,6053                          | 4,71095                  |
| 5,00E-11                                 | 4,60474                         | 4,71042                  |
| 5,00E-10                                 | 4,59922                         | 4,70512                  |
| 1,00E-09                                 | 4,59307                         | 4,69924                  |
| 5,00E-09                                 | 4,54384                         | 4,65219                  |
| 1,00E-08                                 | 4,48225                         | 4,59356                  |
| 5,00E-08                                 | 3,99155                         | 4,13238                  |
| 1,00E-07                                 | 3,37556                         | 3,56716                  |
| 1,25E-07                                 | 3,07405                         | 3,29527                  |
| 1,50E-07                                 | 2,87745                         | 3,11854                  |
| 1,75E-07                                 | 2,70448                         | 2,96174                  |
| 2,00E-07                                 | 2,58374                         | 2,85179                  |
| 2,25E-07                                 | 2,57144                         | 2,84055                  |
| 2,50E-07                                 | 2,5679                          | 2,83731                  |
| 2,75E-07                                 | 2,56523                         | 2,83486                  |
| 3,00E-07                                 | 2,56399                         | 2,83275                  |
| 4,00E-07                                 | 2,55551                         | 2,82596                  |
| 5,00E-07                                 | 2,54968                         | 2,82062                  |
| 1,00E-06                                 | 2,51267                         | 2,78671                  |

Таблиця 4

Значення потенціалу плаваючого вузла і фотодіода після закінчення стадії передачі заряду із фотодіода в плаваючий вузол для експериментів з різною потужністю світла для підключеної до плаваючого вузла ємності  $1,5\epsilon^{-16}$  Ф.

| Потужність світла, [Вт/см <sup>2</sup> ] | Потенціал плаваючого вузла, [В] | Потенціал фотодіода, [В] |
|--|---------------------------------|--------------------------|
| 5,00E-12                                 | 4,49152                         | 4,69848                  |
| 5,00E-11                                 | 4,49092                         | 4,69791                  |
| 5,00E-10                                 | 4,48496                         | 4,6923                   |
| 1,00E-09                                 | 4,47833                         | 4,68606                  |
| 5,00E-09                                 | 4,42519                         | 4,63624                  |
| 1,00E-08                                 | 4,35867                         | 4,57421                  |
| 5,00E-08                                 | 3,82692                         | 4,08682                  |
| 1,00E-07                                 | 3,15639                         | 3,4905                   |
| 1,25E-07                                 | 2,83107                         | 3,20463                  |
| 1,50E-07                                 | 2,6201                          | 3,0179                   |
| 1,75E-07                                 | 2,43541                         | 2,8523                   |
| 2,00E-07                                 | 2,30718                         | 2,7364                   |
| 2,25E-07                                 | 2,29415                         | 2,72456                  |
| 2,50E-07                                 | 2,2904                          | 2,72115                  |
| 2,75E-07                                 | 2,28757                         | 2,71857                  |
| 3,00E-07                                 | 2,28512                         | 2,71635                  |
| 4,00E-07                                 | 2,27727                         | 2,70919                  |
| 5,00E-07                                 | 2,27103                         | 2,70351                  |
| 1,00E-06                                 | 2,23589                         | 2,67153                  |

Таблиця 5

Значення потенціалу плаваючого вузла і фотодіода після закінчення стадії передачі заряду із фотодіода в плаваючий вузол для експериментів з різною потужністю світла для підключеної до фотодіода ємності  $1,5e^{-15}$  Ф.

| Потужність світла, [Вт/см <sup>2</sup> ] | Потенціал плаваючого вузла, [В] | Потенціал фотодіода, [В] |
|--|---------------------------------|--------------------------|
| 5,00E-10                                 | 4,47207                         | 4,87813                  |
| 1,00E-09                                 | 4,46658                         | 4,87303                  |
| 5,00E-09                                 | 4,42236                         | 4,83221                  |
| 1,00E-08                                 | 4,36672                         | 4,78132                  |
| 5,00E-08                                 | 3,91747                         | 4,37847                  |
| 1,00E-07                                 | 3,34492                         | 3,88292                  |
| 2,00E-07                                 | 2,2536                          | 2,92796                  |
| 2,25E-07                                 | 2,07554                         | 2,76638                  |
| 2,50E-07                                 | 1,90855                         | 2,6133                   |
| 3,00E-07                                 | 1,8016                          | 2,51414                  |
| 4,00E-07                                 | 1,7921                          | 2,50531                  |
| 5,00E-07                                 | 1,78554                         | 2,49921                  |
| 1,00E-06                                 | 1,76094                         | 2,47634                  |
| 5,00E-06                                 | 1,68963                         | 2,41006                  |
| 1,00E-05                                 | 1,68478                         | 2,38689                  |
| 5,00E-05                                 | 1,59425                         | 2,32087                  |